

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Sustentabilidade Energética do Etanol de Primeira Geração no Brasil :  
Uma Releitura Crítica de Referenciais Metodológicos**

**LISIONG SHU LEE**

**SÃO CARLOS - SP  
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Sustentabilidade Energética do Etanol de Primeira Geração no Brasil :  
Uma Releitura Crítica de Referenciais Metodológicos**

**LISIONG SHU LEE**

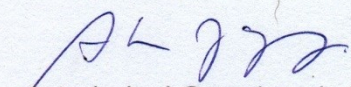
**Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós Graduação em Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
São Carlos, para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Química na  
área de Pesquisa e Desenvolvimento  
de Processos Químicos**

**Orientador: Prof. Dr. Antonio José Gonçalves da Cruz  
Co-Orientador: Prof Dr. Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro**

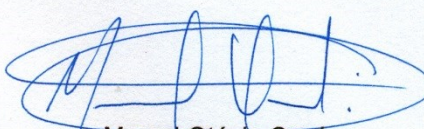
**SÃO CARLOS - SP  
2017**

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
LISIONG SHU LEE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 01  
DE FEVEREIRO DE 2017.

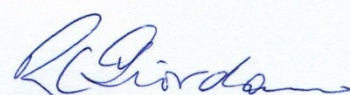
BANCA EXAMINADORA:

  
Antonio José Gonçalves da Cruz  
**Orientador, UFSCar**

  
Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro  
**UFSCar**

  
Marcel Otávio Cerri  
**UNESP**

  
Márcio Turra de Ávila  
**UFSCar**

  
Roberto de Campos Giordano  
**UFSCar**

**Curiosidade e Conhecimento são o fulcro e a alavanca que movem a humanidade**

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais aos meus orientadores, que ousaram confiar a um mestrando um tema novo, que não estava na lista dos temas propostos pelo DEQ. E adicionalmente, deram a liberdade quase total para pesquisar caminhos novos, sem tolher curiosidade ou iniciativa própria, porém mantendo os pés no chão e evitando divagações que desvie do tema escolhido.

Especial reconhecimento ao Prof. Dr. Roberto de Campos Giordano, pelo estímulo para continuar mesmo quando desanimava, pelas horas que dedicou a conversar sobre temas relacionados, e me transformou em um admirador de termodinâmica. O reconhecimento se estende ao Prof. Dr. José Mansur Assaf, que foi um dos primeiros a me estimular a aprofundar na área de energia renovável, começando pelo biodiesel, e que também dedicou inúmeras horas para trocar idéias, a apontar tópicos para estudo, evitando perda de tempo com becos sem saída.

Embora numerosos demais para nominar, um agradecimento a todos os docentes, professores e tutores da UFSCar, que me transformaram em um entusiasmado Engenheiro Ambiental, permitido correlacionar Ecologia com MacroEconomia, fundamentando a escolha deste tema sobre energia renovável.

Profundo respeito aos docentes do DEQ que pacientemente conseguiram ensinar os fundamentos de Engenharia Química para um empedernido economista profissional.

Por fim, menção especial à pessoa que cometeu a imprudência de casar comigo e permanecer ao meu lado por 41 anos, suportando minha dedicação ao aprendizado, desde a época do INPE. Aceitando com muito carinho, dedicação e resignação a existência da única rival que ela teve: minha sede por conhecimento.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este estudo a todas as pessoas que procuram a verdade científica, mesmo que remem contra a corrente predominante. São estas pessoas desbravadoras que criam degraus de conhecimento, em cima dos quais os futuros pesquisadores se apoiam para elevar o conhecimento científico da humanidade.

Este trabalho também é dedicado a todos os profissionais, pesquisadores científicos ou administradores, que se preocupam com o planejamento a longo prazo da sociedade humana. Sem planejamento, desperdiçamos energia física e intelectual em processos que podem se anular, no lugar de maximizar sinergias e resultados. Sem planejamento, a humanidade corre o risco de chegar a um beco sem saída, sem tempo de evitar uma grande crise, e ter que retroceder no bem estar material que conseguiu até agora.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	6
<b>SUMÁRIO</b> .....	7
<b>RESUMO</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	12
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	13
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	14
<b>NOMECLATURA e ABREVIATURAS</b> .....	15
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1 Energia e Revolução Industrial.....	20
1.2 Energia fóssil e a bolha de consumo.....	28
1.3 “Peak Energy” já passou.....	32
1.4 Sociedade sem energia fóssil .....	37
1.5 Sociedade sem petroquímica .....	38
1.6 Objetivos.....	38
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	40
2.1 Escopo do Estudo.....	41
2.2 Metodologia de Revisão Bibliográfica .....	44
2.3 Classificação de Energias .....	47
2.4 Sustentabilidade: conceito “escorregadio” .....	52
2.5 O que é realmente sustentabilidade.....	52
2.6 Indicadores sustentabilidade .....	53
2.7 Origem de tudo: o SOL.....	55
2.8 Cana-de-açúcar: energia quase primária.....	57
2.9 Caracterização da cana.....	58
2.10 Histórico etanol automotivo no Brasil .....	59
2.11 Incertezas e Erros na Literatura .....	62
2.12 Resultados e conclusões da literatura .....	66
2.13 Nitrogenados: atenção especial.....	68
2.14 Dados primários e resultados da Fase Agricultura.....	75
2.15 Dados primários e resultados da Fase Industrial.....	76
2.16 Dados primários e resultados da Fase Distribuição .....	78
2.17 Resultados de coprodutos na Fase Industrial .....	79
2.18 Agricultura Industrial.....	80
2.19 Energia direta e indireta/embutida.....	82

2.20	Uso intensivo energia fóssil.....	84
2.21	Energia de produção, manutenção, movimentação e transporte.....	86
2.22	Energia de serviços ambientais.....	87
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	89
3.1	Dados Primários e Secundários .....	91
3.2	Verificação de Dados Primários .....	93
3.3	Vetor Energia Total .....	94
3.4	Recálculo de Dados Secundários.....	96
3.5	Parâmetros .....	96
3.6	Ciclo Produtivo.....	97
3.7	Detalhamento da Fase Agrícola.....	99
3.7.1	Grupo Preparação de Terreno .....	101
3.7.2	Grupo Plantio.....	103
3.7.3	Grupo Manejo.....	104
3.7.4	Grupo Colheita.....	105
3.7.5	Grupo Entrega.....	107
3.8	Detalhamento da Fase Industrial.....	108
3.9	Detalhamento da Fase Distribuição .....	111
3.10	Metodologia de cálculo da energia total .....	112
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	114
4.1	Fase Agrícola.....	120
4.2	Fase Industrial.....	125
4.3	Fase Distribuição .....	127
4.4	Análise Vetor Energia.....	129
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	145
5.1	EROI Sustentável.....	145
5.2	Maiores necessidades de Energia.....	146
5.3	Energias não Contabilizadas .....	149
5.4	Oportunidades de Melhorias.....	151
5.5	Limitações Futuras.....	153
5.6	Diferenças nos resultados .....	155
5.7	Outras Energias Renováveis .....	158
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	161
7	APÊNDICES .....	189
7.1	A1 - Dados Primários .....	190
7.2	A2 - Dados Secundários .....	229
7.3	A3 - Tratores, Implementos e Veículos .....	238
7.4	A4 - Equipamentos Industriais e Edifícios .....	243
7.4.1	Predios Industriais.....	245



7.4.2	Escritórios .....	245
7.4.3	Oficinas .....	245
7.4.4	Laboratório .....	246
7.4.5	Tancagem .....	246
7.4.6	Esteira Cana .....	247
7.4.7	Esteira Bagaço .....	248
7.4.8	Mesa Lavagem .....	248
7.4.9	Moendas .....	248
7.4.10	Turbinas Geradores .....	248
7.4.11	Caldeiras .....	249
7.4.12	Destilaria Aço Carbono .....	249
7.4.13	Destilaria Aço Inox .....	249
7.5	A5 - Parâmetros e Constantes .....	250

## RESUMO

A longo prazo, toda a energia fóssil, como petróleo, gás natural, carvão mineral, e material radioativo, se esgotará. Em um horizonte de um ou dois séculos, toda energia será proveniente de fontes renováveis. O conceito de energia sustentável, sem energia fóssil, se apoia no tripé velocidade de formação da energia, impactos ambientais corrigidos no período de produção, e manutenção do bem estar físico e social por milênios. A única fonte de energia realmente renovável que atende todos os requisitos é a energia proveniente do sol. Mesmo a energia hidráulica, usada desde a época dos gregos antigos, é energia solar indireta, sendo uma tecnologia madura. Tecnologias nascentes permitem capturar energia solar das seguintes formas: como biomassa, como energia elétrica por meio de tecnologia fotovoltaica e eólica e como calor, por meio da concentração da energia solar. As quatro alternativas fornecem energia secundária conveniente: combustíveis líquidos e eletricidade. No Brasil, a cana-de-açúcar, uma planta de fotossíntese C4, apresenta alta produtividade em termos de toneladas por hectare por ano, e alto conteúdo de açúcares por tonelada de cana. No processo de produção de etanol, o bagaço gerado como subproduto é usado para obtenção de energia (térmica e elétrica) para auto consumo. O etanol é produzido pela fermentação dos açúcares (principalmente a sacarose) presentes no caldo da cana. Nesse contexto, até que ponto o etanol é sustentável segundo o tripé acima citado? Existem muitos estudos sobre a sustentabilidade do etanol de cana, com indicadores como relação entre a energia fóssil usada e a energia útil, emissões de CO<sub>2</sub>eq, e impactos ambientais de resíduos como vinhaça e torta de filtro. Estes estudos assumem implicitamente que existe energia fóssil em abundância e relatam um EROI (Energy Return Over Invested) entre 8 a 11. Poucos autores relatam um EROI na faixa de 3 a 5. Esta dissertação inclui créditos de coprodutos como eletricidade excedente, e assume o uso da mais avançada tecnologia industrial. Cuidado especial foi dedicado à verificação de valores e consistência dos dados primários, com registro do valor máximo, valor mínimo e valor adotado com justificativa. Cada valor secundário teve a metodologia de cálculo documentada, permitindo reprodutibilidade dos resultados por qualquer pesquisador. O resultado obtido foi um EROI de 1,67. Também constatou-se que o Brasil não teria terra nem insumos suficientes para produzir toda a energia consumida em 2015. A produção de etanol, apesar de contribuir de forma significativa para absorção do dióxido de carbono da atmosfera, precisará ser complementada por outras tecnologias de produção de energia sustentável que usem menos recursos físicos.

Palavras-chave: Etanol; Sustentabilidade; Intensidade de energia; Biocombustível, Peak oil, energia fóssil

## ABSTRACT

In the long run, all fossil energy, such as oil, natural gas, coal, and radioactive material, will run out. Within a horizon of one or two centuries, all energy must come from renewable sources. The concept of sustainable energy, without fossil energy, relies on the tripod speed of energy formation, environmental impacts corrected in the production period, and maintenance of physical and social well-being for millennia. The only renewable energy source that meets all requirements is the energy from the sun. Even the hydraulic energy, used since the time of the ancient Greeks, is an indirect solar energy, and is a mature technology. Nascent technologies allow capture solar energy in the following ways: as biomass, as electricity using photovoltaic and wind technologies, and as heat by concentrating solar energy. The four alternatives provide convenient secondary energy: liquid fuels and electricity. In Brazil, sugarcane, a C4 photosynthesis plant, presents high productivity in terms of tons per hectare per year, and high sugar content per ton of sugarcane. In the ethanol production process, bagasse generated as a by-product is used to obtain energy (thermal and electric) for self consumption. Ethanol is produced by the fermentation of the sugarcane juice, which contains mainly sucrose. To what extent is ethanol sustainable according to the tripod mentioned above? There are many studies on the sustainability of sugarcane ethanol, with indicators such as the relation between fossil energy used and useful energy, CO<sub>2</sub>eq emissions, and environmental impacts of residues such as vinasse and filter cake. These studies implicitly assume that there is abundant fossil energy. They report an EROI (Energy Return Over Invested) between 8 and 11. Few authors report an EROI in the range of 3 to 5. This dissertation includes co-product credits as surplus electricity, and assumes the use of the best industrial technology. Special care was devoted to verifying values and consistency of the primary data, with record of maximum value, minimum value, and value adopted with justification. Each secondary value has been documented with calculation methodology, allowing reproducibility of the results by any researcher. The result was an EROI of 1.67. It is also noted that Brazil would not have enough land or agricultural inputs to produce all the energy consumed during year 2015. Ethanol production, while contributing significantly to the absorption of carbon dioxide from the atmosphere, will need to be complemented by other sustainable energy production technologies that use less physical resources.

Keywords: Ethanol; Sustainability; Energy intensity; Biofuel, Peak oil, Fossil energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Suprimento de energia primária ao longo do tempo.....	21
Figura 1-2	Consumo per capita representativos ao longo do tempo .....	29
Figura 1-3	Consumo em GJ/habitante/ano ao longo da história recente.....	31
Figura 1-4	Curva de Hubbert : produção individual e coletiva em Peak Oil .....	34
Figura 1-5	Produção de petróleo americano com e sem petróleo do Alasca.....	35
Figura 1-6	Declínio novas descobertas e produção previstas.....	36
Figura 2-1	Fases e Fronteiras do Ciclo Produtivo de E1G de cana-de-açúcar .....	40
Figura 2-2	Energia Direta aparente e Energia Indireta embutida.....	43
Figura 2-3	Energia Primária: Definição e exemplos .....	48
Figura 2-4	Energia Secundária: Definição e exemplos .....	49
Figura 2-5	Figura Energia Fóssil: Definição e exemplos.....	50
Figura 2-6	Energia Renovável: Definição e exemplos.....	51
Figura 2-7	Balço energia solar na Terra. ....	56
Figura 2-8	Dependência de alimentos e petróleo refletido no custo .....	81
Figura 2-9	Relação de produtividade agrícola e uso de adubos nitrogenados .....	81
Figura 3-1	Esquema simplificado produção Energia Renovável .....	90
Figura 3-2	Ciclo Produtivo Atual usando energia fóssil .....	97
Figura 3-3	Fase Agrícola e grupos de atividades .....	100
Figura 3-4	Grupos e Atividades da Fase Industrial.....	108
Figura 3-5	Atividades da Fase Distribuição .....	112
Figura 5-1	Demanda de energia por Grupo de Atividades por Safra .....	147
Figura 7-1	Trator de pequeno porte com implementos .....	197
Figura 7-2	Fluxograma simplificado de mineração de ferro e principais entradas .....	201
Figura 7-3	Trator pequeno porte com TDA e pneus apropriados não direcionais .....	216
Figura 7-4	Trator pesado 370HP com TDA para arrasto de carga agrícola em vias OTR.....	217
Figura 7-5	Trator extra pesado para tração extrema.....	217
Figura 7-6	Trator representativo com pneus típicos e 323kg por pneu ponderado .....	218

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1	Fluxo e Consumo de macronutrientes NPK no Brasil em mil ton .....	25
Tabela 1-2	Relação entre Importação e Produção brasileira ao longo dos anos.....	26
Tabela 1-3	Projeção e realidade de consumo e importação sobre produção NPK .....	27
Tabela 1-4	Suprimento de energia moderna e biomassa tradicional .....	30
Tabela 2-1	Estimativa de vida útil para Reservas Comprovadas.....	41
Tabela 2-2	Tabela correlação entre Demanda Energia e Emissão CO <sub>2</sub> eq .....	65
Tabela 2-3	Resultados relatados na literatura .....	67
Tabela 2-4	Energia para produção de 1kg de Amônia.....	70
Tabela 2-5	Energia direta produção Uréia .....	72
Tabela 2-6	Necessidade de nitrogênio elemental por hectare por safra.....	74
Tabela 2-7	Distribuição percentual energia necessária produção de alimentos .....	83
Tabela 3-1	Atividades do Grupo Preparação de Terreno .....	101
Tabela 3-2	Atividades do Grupo Plantio .....	103
Tabela 3-3	Atividades do Grupo Manejo .....	105
Tabela 3-4	Atividades do Grupo Colheita .....	105
Tabela 4-1	Resultados Balanço Energético EIG.....	116
Tabela 4-2	Consumo Energia por Grupo de atividades na Fase Agrícola.....	122
Tabela 4-3	Energia usada por atividade agrícola. (MJ/ha) .....	123
Tabela 4-4	Resultados da Fase Industrial (MJ/ha).....	126
Tabela 4-5	Resultados energia por atividade Ciclo Etanol de Cana-de-Açúcar (MJ/ha) .....	132
Tabela 4-6	Tabela Vetor Energia com Componentes cada atividade no Ciclo de Etanol .....	135
Tabela 4-7	Correlação entre Número Atividade e Descrição Atividade .....	137
Tabela 4-8	Energia total usada para ciclo de EIG.....	139
Tabela 4-9	Análise Horizontal dos resultados Fase Agrícola.....	140
Tabela 4-10	Análise Vertical Energia Fase Agrícola.....	141
Tabela 4-11	Análise Horizontal atividades de adubação agrícola.....	142
Tabela 4-12	Análise Horizontal do Grupo Colheita.....	143
Tabela 5-1	Demanda de energia por Grupo de Atividades por Safra .....	146
Tabela 5-2	Energia por Atividade por Safra no Grupo Plantio em MJ/ha.....	147
Tabela 5-3	Demanda de energia por Grupo de Atividades me MJ/ha .....	148
Tabela 5-4	Relação entre EROI e TONP.....	154
Tabela 7-1	Tratores e caminhões típicos em fazenda de cana-de-açúcar .....	238
Tabela 7-2	Veículos da Legislação Denatran e Normas DNIT .....	240
Tabela 7-3	Atributos e características de veículos de carga .....	241
Tabela 7-4	Lista Equipamentos básicos de Usina de Etanol .....	244
Tabela 7-5	Constantes físicas e químicas usadas .....	250

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1-1	Parâmetros para uma Energia Renovável.....	27
Quadro 2-1	Classe de Dados .....	75
Quadro 3-1	Vetor Energia e seus componentes .....	95
Quadro 4-1	Atividades e Variáveis omitidas no modelo.....	117
Quadro 4-2	Fatores que podem melhorar EROI.....	120
Quadro 4-3	Diferenças entre Transporte Cana e Distribuição Etanol .....	128
Quadro 5-1	Energias não contabilizadas .....	150
Quadro 5-2	Resumo pontos a melhorar na eficiência energética .....	152
Quadro 5-3	Resumo dos fatores que diferencia o valor do EROI .....	156

## NOMECLATURA e ABREVIATURAS

Acrônimo	Descrição
anoC	Ano colheita, usado para distribuir energia ou massa acumulada em 6 anos do ciclo completo, em 5 colheitas da cana-de-açúcar. Ano calendário normal continua sendo grafado “ano”.
APWeq	Areal Power Watt Equivalent, fluxo de energia por área ocupada, medido em W/m <sup>2</sup> . Mede quantos Watts equivalentes por metro quadrado conseguimos de energia líquida com determinada fonte de energia, para fins de otimização de um recurso escasso: terra disponível. Deve ser comparado com a referência de 173,5W/m <sup>2</sup> para a energia solar incidente no equador da Terra nos dias de equinócio. É uma figura de mérito para comparar eficiência de uso de terra no desenvolvimento de energias renováveis como PV, CSP, eólica, bioenergia.
BDEP	Banco de Dados de Exploração e Produção; dados da Agência Nacional do Petróleo sobre exploração e produção petróleo no Brasil
BEP	Barril Equivalente de Petróleo, energia de um barril de petróleo. Por definição equivale a $6,119324 \times 10^{+09} \text{ J}$ , ou 1,699812 MWh
BOE	Barrel of Oil Equivalent, energia de um barril de petróleo. Por definição equivale a $6,119324 \times 10^{+09} \text{ J}$ , ou 1,699812 MWh
BTL	Biomass To Liquid, rota química e bioquímica para transformar biomassa em algum líquido com alta densidade de energia
BTU	British Thermal Unit equivalente a 1.055,056 J
Cana planta	Cana da primeira colheita após plantio em reforma de canavial
Cana soca	Cana colhida na segunda colheita do ciclo de 6 anos
Cara rassoca	Cana colhida na terceira colheita em diante do ciclo de 6 anos
CHONS	Macronutrientes indispensáveis para a maioria dos seres vivos. É o grupo Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio e Enxofre.
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão, aqui definido como um atm (101.325 Pa), 15 °C (288,15 K)
CO <sub>2</sub> eq	CO <sub>2</sub> propriamente dito e outros gases com efeito de aquecimento global equivalente ao CO <sub>2</sub>
CSP	Concentrated Solar Power, energia elétrica gerada usando turbinas convencionais com vapor superaquecido, tendo como fonte de calor a radiação solar concentrada por meio de espelhos ou lentes.
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
E1G	Etanol de primeira geração, normalmente obtido por fermentação de açúcares simples como sacarose, ou açúcares provenientes da hidrólise de amiláceos
E2G	Etanol de segunda geração, obtido de biomassas celulósicas, as quais são hidrolisadas em seus monômeros (hexoses e pentoses), os quais seguem para fermentação para produzir etanol

EA	Energy Analysis, análise de energia usada para geração de um produto, desde geração dos insumos até disponibilidade do produto para uso imediato. Medida em Joules.
EFP	Energy Foot Print, a intensidade de energia de um produto ou serviço. Energia total necessário para a sua produção e disponibilização ao consumidor. Medido em MJ/kg ou MJ/litro de produto físico produzido, ou em MJ/R\$ para serviços não físicos. Outras mensurações são possíveis, embora não usados nesta dissertação.
EMA	Emergy Analysis, semelhante ao EA, mas contabiliza emergy (emergia) no lugar de energia. Os resultados finais são emergy, expressa em seJ/kg ou seJ/litro ou seJ/R\$, embutida na existência do produto
EMERGY	Embodied Energy, emergia embutida em toda a cadeia de produção desde a fonte mais primária até o produto em estudo
EPE	Empresa Pesquisa Energética, empresa governamental brasileira que consolida o BEN (Balanço Energético Nacional) anual
EROI	Energy Return Over Invested, é um índice adimensional, calculado dividindo MJ de energia líquida disponível sobre MJ de energia total investida durante toda a vida útil do sistema de produção da energia.
FFV	Flex Fuel Vehicle, veículo que usa gasolina, etanol ou a mistura gasolina e etanol aditivado com 15% de gasolina. Não confundir com motores “flex” brasileiros, que podem consumir qualquer mistura combustível, variando desde gasolina pura com mínimo de 22% de E1G anidro, até E1G hidratado com 6% de água.
FIR	Far Infrared Radiation, radiação infravermelho com comprimentos de onda na faixa de 4,0 a 100,0 micrômetros. A retenção de FIR por GEE/GHG é o Efeito Estufa
GEE	Gases Efeito Estufa (Green House Gases)
GHG	Green House Gas (Gas Efeito Estufa)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo, gás combustível composto quase na sua totalidade, por propano e butano
GN	Gás Natural, gás combustível composto quase na sua totalidade por metano
Gold Standard	Dado padrão, amplamente divulgado, usado pela maioria dos pesquisadores, sem necessidade de verificação
ICE	Internal Combustion Engine, motor com combustão interna de combustível
Inerte	Térmo que é usado especificamente nas áreas de mineração e adubos, significa a parte não útil para o produto final, mas faz parte da sua composição e da sua massa.
K	Temperatura absoluta em graus Kelvin
LCA	Life Cycle Analysis, também denominado Análise de Ciclo de Vida, ACV. Estudo de um produto desde geração dos insumos, passando pelo processo produtivo, até uso e destinação final dos seus resíduos, estimando os impactos ambientais, consumo de energia e emissão de GHG



MTEP	Mega Tonelada Equivalente Petróleo, equivalente a $1,000 \times 10^{16}$ calorias (definição) ou equivalente a $4,148 \times 10^{16}$ J
NEV	Net Energy Value, a razão entre a energia líquida conseguida a partir da energia bruta extraída. Parâmetro importante para eficiência de aproveitamento de energia fóssil.
NIR	Near Infrared Radiation, radiação na faixa infravermelho próximo, com comprimento de onda de 700nm a 4.000nm
NPK	Macronutrientes N, P e K, geralmente combinados industrialmente em proporções variadas, adequadas para uma combinação de cultivar de cana, solo, relevo e clima. O produto industrializado é complementado com inerte, por determinação regulatória, para que atenda à rotulagem percentual dos componentes ativos N,P e K. por exemplo, uma formulação 5-10-20 contém, para uma massa de 100kg, 5kg de nitrogênio elemental, 10kg de $P_2O_5$ equivalente, e 20kg de $K_2O$ equivalente, mais material inerte até completar 100kg. Este inerte influencia muito no consumo de energia para movimentação de insumos agrícolas.
°C	Temperatura em graus Celsius
OIE	Oferta Interna de Energia, segundo EPE, é a oferta total de energia ao consumidor final.
ONS	Operador Nacional do Sistema (elétrico), órgão brasileiro que controla e operacionaliza a rede nacional de transmissão elétrica interligada, permitindo equilibrar oferta e demanda de energia elétrica com uma rede integrada. Não opera a rede de distribuição. Não gera energia elétrica.
OTR	Off-The-Road, designação para pneus especializados para trabalho em locais não pavimentados e serviço pesado, como mineração e tratores.
Pa	Pascal, unidade medida de pressão equivalente a 1 Newton por metro quadrado
PAR	Photosynthetic Active Radiation, radiação na faixa de energia que consiga ativar fotossíntese em organismos autótrofos
Payload	É a carga útil de um veículo de carga, ou a carga útil de um conjunto de veículos de carga. Este valor é calculado deduzindo do PBT o peso do veículo em ordem de marcha e o peso dos implementos e acessórios. Para o mesmo veículo, Payload varia conforme o peso dos implementos e acessórios para cargas ou funções específicas. A Tara especificada pela maioria dos fabricantes de veículo é o peso do veículo em ordem de marcha (abastecido e com todos os fluidos). Alguns fornecedores indicam como Tara o peso do veículo sem combustível (que varia de 100kg a 900kg por veículo).
PBT	Peso Bruto Total, o peso máximo que uma combinação de veículo de carga pode pesar, somando Tara e Payload, conforme determinado pela legislação em vigor para cada configuração de tração e eixos
Peak Gas	Mesmo conceito de peak oil mas referente a gás natural

Peak Oil	Período temporal quando aproximadamente metade das reservas comprovadas e prováveis de petróleo já foi consumida. Neste cômputo não são contadas reservas possíveis. Peak Oil pode ser estimado globalmente ou por região, depende da organização que está fazendo a análise.
PER CAPITA	Rateio de qualquer mensuração pelo número de habitantes de um grupo social, como um país, estado, cidade, etc. Exemplo: renda per capita, energia per capita.
Peso em ordem de marcha	Peso líquido de veículo de carga incluindo todos os fluidos necessários para entrar em operação, tais como fluido de radiador, lubrificantes, combustíveis, implementos e acessórios funcionais.
QAV	Querosene de Aviação, derivado de destilação de petróleo, em temperaturas de 150°C a 300°C, com compostos com 9 a 15 carbonos, podendo ter alifáticos, ramificados até cíclicos
Reserva comprovada	Quantidade de energia primária comprovada em um reservatório ou bacia ou jazida. Quantidade já em produção comercial com a tecnologia atual de extração em operação.
Reserva possível	Quantidade de energia primária possível, isto é, em uma região onde temos várias bacias ou jazidas em exploração comercial, temos áreas promissoras mas que ainda não entraram em operação comercial. Normalmente estas reservas não entram nos balanços contábeis de empresas de energia, pois não há a menor garantia que exista energia comercialmente viável nas novas áreas..
Reserva provável	Quantidade de energia primária provável, isto é, os limites físicos do reservatório ou bacia ou jazida delimitada mostram potencial de mais energia extraível, porém com mudança de tecnologia de extração, provavelmente com aumento de custo operacional.
seJ	Solar Energy Joule, usado para medir “joules de energia” da energia solar acumulada em um produto ou serviço
seJ/J	Transformidade, Solar Energy Joule embutido em Joule disponível
Shale Oil	Óleo extraído da camada porosa abaixo de bolsões de óleo e gás normais. Este óleo e gás aprisionado na porosidade é que migra lentamente para formar as bacias de petróleo e gás natural. Precisa de pré tratamento antes de poder ser usado.
Tandem	Designação de dois ou três eixos instalados bem perto um do outro, para aumentar a capacidade de carga de um veículo de carga. A distância entre os eixos afeta a capacidade de carga permitida pela legislação brasileira. Eixos Tandem podem ser motrizes ou arrastados.
Tara	Peso líquido de veículo de carga, sem carga (sem payload)
TDA	Tração Dianteira Auxiliar, termo usado para designar tratores com tração dianteira complementar em uma configuração 4 x 4.
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo, energia de uma tonelada métrica de petróleo equivalente a $1,000 \times 10^{10}$ calorias (definição) ou equivalente a $4,148 \times 10^{10}$ J
TOE	Ton of Oil Equivalent, energia de uma tonelada métrica de petróleo

TONP	Total Over Net Production, dá a relação entre a energia Total que deve ser produzida para uma necessidade de energia Líquida. É relacionado com EROI pela equação $TONP = \frac{EROI}{EROI-1}$
Transformidade	Indicador de eficiência e produtividade de um produto em uma escala hierárquica de qualidade de energia. Medido em seJ/J
Trucado	Veículo de carga que usa dois ou mais eixos tandem que exercem tração. Pode ser um caminhão simples ou um cavalo mecânico rebocando um combinado de veículos de carga.
Turn Key	Sistemas tipo turn key são sistemas complexos feito sob medida para um cliente que não tem conhecimento especializado. Normalmente são feitos por integradores de sistemas, com componentes de vários fornecedores, em uma configuração que não é repetida para outro cliente.
UV	Radiação Ultra Violeta, radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 10nm a 400nm (dez a quatrocentos nanômetros). Vai do limite do RaioX até a radiação visível ao ser humano. A banda que chega à superfície da Terra está situada entre 300nm a 400nm.
Vetor Energia	Um vetor definido e usado nesta dissertação, com 9 componentes, que somados resultam na energia total necessária para a atividade sob análise. Os componentes do vetor são detalhados no Quadro 3-1

# 1 INTRODUÇÃO

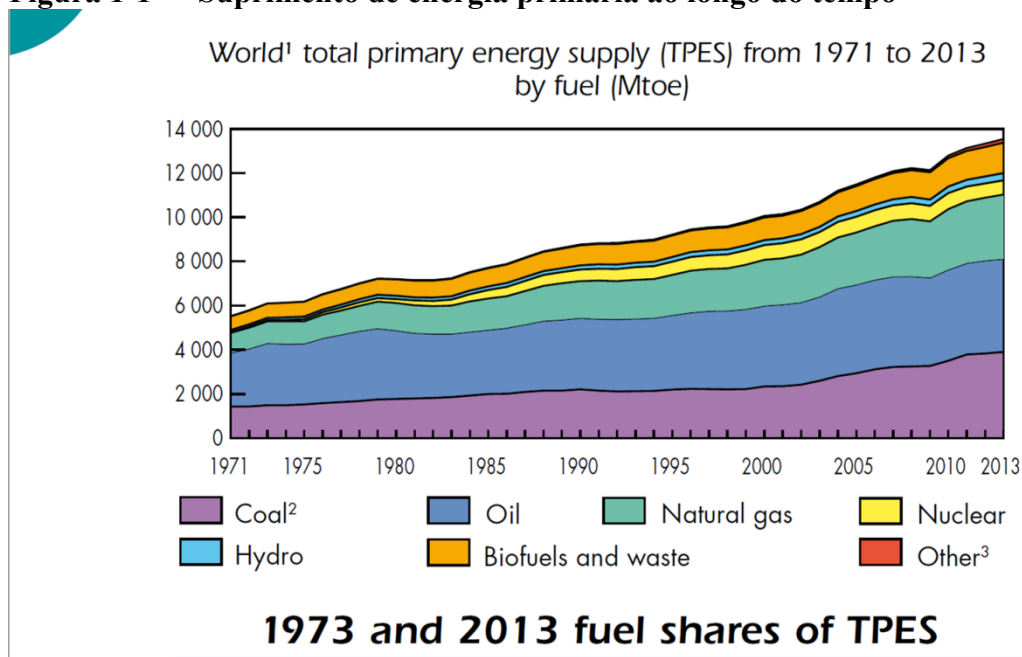
## 1.1 Energia e Revolução Industrial

O progresso material da raça humana pode ser resumido no domínio e uso da energia além daquela proveniente do trabalho humano e animal. A primeira energia “não biológica” utilizada pelo ser humano foi o fogo. Com o desenvolvimento da agricultura, a raça humana pôde direcionar a energia e tempo usados na coleta de alimentos e na migração periódica, à interação familiar e social. Esse fato permitiu a formação de sociedades tribais, e mais energia e tempo pôde ser direcionada para um melhor cuidado para com os descendentes (CHU, 2007). Os excedentes de energia eram armazenados na forma de alimentos vegetais e animais vivos, com energia de biomassa (lenha) como fonte de calor e luz. Dessa forma, com a energia mais facilmente disponível, a humanidade pôde dedicar mais tempo a outras atividades além da simples subsistência.

Em 1712 Thomas Newcomen contrói a primeira máquina a vapor, começando a usar a energia fóssil proveniente do carvão mineral, dando início à Revolução Industrial. Foi seguido em 1764 por James Hargreaves com sua primeira máquina capaz de produzir mais de um novelo de fio de uma vez, e em 1769 James Watt aperfeiçoou a máquina a vapor, produzindo movimento mecânico com rendimento térmico muito maior. Com uso da energia do carvão em uma taxa muito maior que a sua taxa de formação, iniciou-se o uso intensivo de uma poupança energética que foi formada durante centenas de milhões de anos.

Apesar de se ter registros da existência do petróleo e de seu uso há mais de dois milênios (uso de fontes naturais que afloram à superfície do solo), foi somente em 1859 que foi operacionalizado o primeiro poço comercial de petróleo (FARIAS, 2011). No início dos anos 60 o uso da energia proveniente do petróleo se igualou ao da energia do carvão mineral (WEC, 2013). Desde então a energia predominante na sociedade moderna é proveniente do petróleo e do gás natural, além do carvão mineral (IEA, 2015). A Figura 1-1 ilustra o suprimento de energia primária total pelas diferentes fontes.

**Figura 1-1** Suprimento de energia primária ao longo do tempo



fonte: IEA (2015)

A transmissão da eletricidade a longas distâncias teve início pelos anos 1880 (ASSIS, 2010). Inicialmente, a tecnologia empregava geradores de corrente contínua. Alguns anos depois, surgiram os geradores de corrente alternada, permitindo transmissão econômica da eletricidade e variação de tensão elétrica. O uso da eletricidade permitiu o avanço rápido de tecnologias por permitir alta eficiência na aplicação, facilidade de distribuição e tarifação, controle preciso que permitiu toda a energia mecânica com motores elétricos, a microeletrônica moderna e tecnologia da manipulação da informação e comunicação a longa distância.

No século XX, a abundância de energia fóssil e o desenvolvimento da eletrônica, permitiu um avanço extraordinário da ciência em geral e bem estar material. Toda a tecnologia que permite um alto padrão de vida material é baseada em abundância de energia a baixo custo: energia fóssil. É essa energia que permite a produção de toda a maquinaria e equipamentos que sustentam o moderno estilo de vida, movimentam produtos através do mundo, transportam as pessoas diariamente, e processa toda a informação para a complexa sociedade moderna.

No Brasil, em 2014, o consumo per capita diária de energia<sup>1</sup> foi de 170MJ (EPE, 2015). Nos Estados Unidos, esse valor foi de 793MJ (IEA, 2015). O consumo dessa quantidade de energia só é possível devido ao uso da energia fóssil (carvão, petróleo, gás natural) a uma taxa aproximadamente 500.000 vezes maior que sua taxa de formação. Em apenas 140 anos já foram consumidos aproximadamente metade de todas as reservas conhecidas de petróleo e gás natural. Estima-se que o ponto de “peak oil”<sup>2</sup> já foi ultrapassado entre os anos de 2000 a 2010 (WIRTH, 2008; PRINCETON UNIVERSITY, 2010). Energia nuclear<sup>3</sup>, não entra neste cômputo.

Na indústria extrativista da energia fóssil, a energia encontra-se disponível, depositada tanto em terra firme como no leito submarino. A quantidade possível de extração comercial dessa fonte de energia é considerada uma reserva. Existem três tipos de reservas, a saber: reservas comprovadas, reservas prováveis, e reservas possíveis (SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2001). A reserva comprovada é a quantidade que pode ser extraída comercialmente com a tecnologia existente empregada para extração atual. A reserva provável é aquela que já foi descoberta, pertence à mesma bacia, mas precisa de uma nova tecnologia de extração, normalmente mais complexa e mais cara, do que aquela já disponível. A reserva possível é a quantidade que potencialmente poderia ser extraída, com novas tecnologias (as quais ainda não estão operacionais ou não são comercialmente viáveis ainda), nas vizinhanças de uma grande bacia em operação comercial. Os valores de reservas mundiais e nacionais variam em diferentes estudos acadêmicos. Esse fato é justificado em função dos segredos estratégicos de cada país ou de uma empresa que tem concessões em vários países.

Com as estimativas das reservas atuais, em meados da segunda década do século 21, tem-se energia fóssil (petróleo e gás natural) para aproximadamente uns 150 a 200 anos, assumindo um consumo semelhante ao consumo atual. Tem-se mais reservas de carvão que petróleo e gás natural. Quanto às reservas atuais de material radioativo, e mesmo os resíduos nucleares, esses podem gerar grande quantidade de energia,

---

<sup>1</sup> Energia primária usada por um país, dividido pela população total do país. É diferente da energia total usada pela população economicamente ativa para fins de produtividade e intensidade de energia calculado em MJ/\$ ou MJ/R\$

<sup>2</sup> Peak oil é o período temporal quando aproximadamente metade das reservas comprovadas e prováveis de uma de petróleo já foi consumida. Neste cômputo não são contadas reservas possíveis

<sup>3</sup> Material fissionável, embora não seja renovável, formalmente não é considerado fonte de energia fóssil, que estritamente classificado, só engloba os produtos como petróleo, gás natural, carvão e outros produtos carboníferos antigos.

dependendo da tecnologia a ser adotada, e do grau de risco nuclear que a sociedade aceite, usando reatores tipo “fast breeder”<sup>1</sup> (COCHRAN, 2010).

Existe uma correlação positiva entre consumo de energia e bem estar material por habitante, porque os produtos para o bem estar material são produtos industrializados com uso intensivo de energia.. Também existe uma correlação positiva entre o uso intensivo de energia e o produto interno bruto (PIB) de um país, porque a produção de riqueza se baseia na produção intensiva e consumo de produtos em larga escala. (IEA, 2017). A sociedade humana está acostumada às comodidades e facilidades do século XXI, que só são possíveis com uso implícito de energia fóssil a baixo custo. Esta demanda é insustentável a longo prazo na escala da civilização humana (séculos). Toda energia que usamos atualmente, exceto a nuclear e geotérmica, deriva, ou derivou do sol. Desta maneira, uma energia renovável produzida no início do século 21, precisa começar o ciclo de vida de com a caputra de energia solar direta, para depois incluir energia fóssil usada. De forma direta, na forma de combustíveis fósseis, ou de forma indireta, na forma de produtos e serviços necessários para a produção de biomassa e equipamentos.

Um combustível líquido de grande utilidade é o etanol, que pode ser usado diretamente em motores de ciclo Otto, ou adicionado à gasolina para oxigenação adicional e diminuição de emissões de monóxido de carbono (por proporcionar uma combustão mais completa), além de elevar a octanagem<sup>2</sup> da gasolina. No Brasil, a produção de etanol combustível está baseada na extração de sacarose da cana-de-açúcar e a fermentação deste açúcar por leveduras. A cana-de-açúcar, por ser uma planta de fotossíntese C4, gramínea, perene, tem uma alta produtividade na captura da energia solar, tornando a cana energeticamente rentável, conforme detalhado na Revisão Bibliográfica. O Brasil, privilegiado por uma área continental com climas variados, tem alta insolação, estações bem definidas em várias regiões, tem uma alta produtividade de cana-de-açúcar, geralmente denotada em toneladas de cana por hectare plantado por ano

---

<sup>1</sup> Reator “fast breeder” é um tipo de reator usando combustível fissionável, como U238, que é muito mais abundante que U235 usado normalmente. A reação nuclear libera uma grande quantidade de neutrons rápidos, que transformam U238 em Pu238, gerando mais combustível radioativo para reatores que usem diretamente Pu239 e PU240.

<sup>2</sup> Octanagem é a capacidade do combustível para resistir à detonação espontânea durante a fase de compressão em um motor a Ciclo Otto. Quanto maior esta capacidade, maior a possibilidade de aumento da taxa de compressão, e portanto, do rendimento termodinâmico do motor. █

e ATR<sup>1</sup> (Açúcar Total Recuperável) por tonelada de cana colhida. O Brasil possui larga experiência agrícola no cultivo da cana-de-açúcar e uma tecnologia industrial madura na indústria sucroenergética.

Muito tem sido escrito sobre o etanol de primeira geração (E1G)<sup>2</sup>, tanto na literatura acadêmica brasileira como na literatura internacional. A grande maioria do que tem sido publicado foca em eficiência de processos químicos e bioquímicos, em viabilidade financeira e econômica, e nos impactos ambientais. Pouco foi detalhado sobre o balanço energético do ciclo completo da cadeia produtiva do etanol. Os estudos sobre balanço energético de E1G incluem basicamente energia fóssil direta como diesel. Quando muito, incluem a energia de produção de adubos e energia de produção e uso dos equipamentos. O resultado final é que os indicadores de balanço de energia gerados são excessivamente otimistas. Também devido à grande preocupação com o clima global a médio prazo, existe uma grande ênfase em estudos de emissões dos gases do efeito estufa (em inglês, Green House Gas – GHG<sup>3</sup>), mas não de balanço energético. Politicamente existem muitas conferências internacionais que abordam a temática sobre a limitação de emissões, estimulando os estudos acadêmicos a focar em energias consideradas renováveis que emitam menos gases do efeito estufa, quantificados em termos de CO<sub>2</sub>eq<sup>4</sup> (dióxido de carbono equivalente) – ou seja, gases que tenham efeito estufa equivalente ao CO<sub>2</sub> – mesmo que o balanço energético da cadeia produtiva total seja menos favorável.

Em resumo, o direcionamento dos estudos governamentais e acadêmicos é para o curto prazo, para efeitos imediatos no clima, com uso intensivo de energia fóssil sem alocação integral de toda energia embutida. Com este viés, corre-se o risco de enfatizar

---

<sup>1</sup> ATR Açúcares Totais Recuperáveis, inclui açúcar redutor e açúcar não redutor. Também é a base para pagamento de um lote de cana ao produtor. O valor pago por tonelada de cana é proporcional ao ATR medido durante a amostragem da cana na recepção do lote na entrada da usina.

<sup>2</sup> E1G - Etanol produzido por fermentação de matérias-primas açúcaradas ou amiláceas de várias biomassas, como cana-de-açúcar, beterraba, sorgo sacarino, milho. A fermentação produz um vinho (contendo de 50 a 90 g/L de etanol) que é purificado e destilado para obtenção de etanol carburante hidratado ou anidro.

<sup>3</sup> GHG é uma coleção de gases que tem capacidade de retenção de infravermelho longo reemitido pela terra e pelos mares durante o período sem sol. Os efeitos são convertidos para valores equivalentes de CO<sub>2</sub>, medido em CO<sub>2</sub>eq, ou seja, a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente ao efeito do gás GHG sob estudo. Também conhecido pela sigla GEE.

<sup>4</sup> CO<sub>2</sub>eq é a quantidade de outros gases que não CO<sub>2</sub>, que tem efeito equivalente à mesma massa de CO<sub>2</sub> na retenção de calor terrestre. Por exemplo, uma grama de CH<sub>4</sub> tem poder de retenção de 28 a 36 gramas de CO<sub>2</sub>, portanto, quando é reportado que a emissão de CH<sub>4</sub> é de 36 grama de CO<sub>2</sub>eq, na realidade a emissão física foi de apenas uma grama de CH<sub>4</sub>



energia considerada renovável pela baixa emissão de CO<sub>2</sub>eq mas que pode ser inviável sem o uso de energia fóssil.

A literatura publicada com apoio de governos, produtores e organizações independentes são estudos de efeitos locais, com fronteiras muito limitadas, como se procura demonstrar nesta dissertação, tem limitações que tendem a gerar indicadores otimistas. Implicitamente assume-se a presença perene de energia fóssil abundante. E que no futuro as energias ditas renováveis são suficientes para suprir a mesma intensidade de energia atual. Nenhuma destas hipóteses implícitas pode ser assumida como verdadeira a priori.

Em 2015, no Brasil, vinte e oito bilhões de litros de E1G hidratado foram produzidos, o que equivale a 14,43 MTEP (Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo), ou seja, 4,72% de toda a demanda energética do Brasil em 2014, de 306,5 MTEP (EPE, 2015). É preciso produzir 21 vezes a quantidade de E1G atual para suprir a energia demandada em 2014. Uma parte desta energia já é renovável (hidrelétrica, eólica, fotovoltaica. Mesmo contando com energia fóssil abundante, toda a estrutura necessária, (terra, usinas, adubos, distribuição) teria que ser multiplicada por 21. O maior obstáculo é que em 2015 já não se dispunha de adubo suficiente, a maior parte foi importada (ROQUETTE FILHO, 2014). O segundo maior obstáculo é a falta de terra livre adicional para o cultivo da cana-de-açúcar adicional necessária.

**Tabela 1-1 Fluxo e Consumo de macronutrientes NPK<sup>1</sup> no Brasil em mil ton**

	Produção	Importação	Exportação	Consumo	Cons/Prod <sup>2</sup>	Imp/Prod <sup>3</sup>
N	808,2	2.834,4	28,3	3.614,3	4,47	3,51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.010,5	2.285,8	112,6	4.183,7	2,08	1,14
K <sub>2</sub> O	359,2	4.514,5	55,0	4.818,7	13,42	12,57
NPK	3.177,9	9.634,7	195,9	12.616,7	3,97	3,03

**Fonte: ROQUETTE FILHO (2014)**

A Tabela 1-1 é relevante porque mostra um dos pontos fracos da indústria sucroenergética brasileira: a falta de nutrientes para produção de toda a bioenergia

<sup>1</sup> NPK refere-se aos principais macronutrientes necessários para agricultura industrial, de alta produtividade. São as iniciais de Nitrogênio, fósforo e potássio.

<sup>2</sup> Coluna com dados calculados pelo Autor. Roquete Filho (2014) nota que embora Brasil seja o quarto maior consumidor de nutrientes agrícolas do mundo, somos o país que detém a maior taxa de crescimento de consumo, por ter se transformado em um país exportador de alimentos como proteínas e grãos, às custas de uma importação maciça de nutrientes minerais e uso intensivo de terra nova.

<sup>3</sup> Coluna com dados calculados pelo Autor, mostrando a grande dependência de nutrientes importados de longa distância. A energia da importação não foi contabilizada no cálculo do EROI, no cenário de falta de energia fóssil, não existe energia suficiente para importação de minerais tão básicos.

necessária a longo prazo. No Brasil, importa-se, em média, 3 vezes mais nutrientes que a produção local, e a importação vem aumentando anualmente. Além disso, o produto importado vem de locais muito distantes, como Canadá, Oriente Médio, Rússia (ROQUETTE FILHO, 2014). Ao incluir a energia necessária para esta importação, há um grande impacto no EROI<sup>1</sup> calculado para o EIG brasileiro. Nesta dissertação, no cálculo do EROI de EIG, não foi considerada a energia necessária para a mineração e transporte destes insumos importados. Esta decisão é baseada na hipótese de que a longo prazo, é improdutivo usar energia para trazer insumos agrícolas para produzir energia de biomassa local. Toda produção agrícola terá que ser mantida com produção e reciclagem local dos nutrientes NPK e outros macronutrientes.

Mais relevante ainda é a variação da importação ao longo dos anos, conforme a Tabela 1-2. A variação foi muito maior que o aumento populacional, e coincidiu com o fenômeno do agronegócio superar a indústria como o motor do crescimento do PIB. A conclusão é que importamos cada vez mais insumos agrícolas para alimentar o mundo com alimentos baratos.

**Tabela 1-2 Relação entre Importação e Produção brasileira ao longo dos anos**

Ano	N (nitrogênio)		P (fósforo)		K (potássio)	
	Prod <sup>2</sup>	Import <sup>3</sup>	Prod	Import	Prod	Import
1990	81 %	19 %	90 %	10 %	6 %	94 %
2000	38 %	62 %	57 %	43 %	12 %	88 %
2007	25 %	75 %	49 %	51 %	9 %	91 %
2014 <sup>4</sup>	18 %	82 %	35 %	65 %	6 %	94 %

**Fonte: LOBO (2008)**

A Tabela 1-3 mostra as diferenças entre as projeções feitas por LOBO (2008) e a realidade em 2014 (ROQUETTE FILHO, 2014), em relação ao consumo, produção e importação de nutrientes NPK.

<sup>1</sup> EROI é Energy Return Over Invested, a energia total obtida pela energia investida. Deve ser maior que 1,0 para que a produção energética seja viável, ou seja, a cadeia produtiva da energia produz mais energia que o total gasto para a sua produção.

<sup>2</sup> Percentual da produção nacional sobre (produção+importação)

<sup>3</sup> Percentual da importação sobre (produção+importação)

<sup>4</sup> Projeção para o ano 2014

**Tabela 1-3 Projeção e realidade de consumo e importação sobre produção NPK<sup>1</sup>**

Autor	N		P		K	
	C/Prod <sup>2</sup>	I/Prod <sup>3</sup>	C/Prod	I/Prod	C/Prod	I/Prod
ROQUETE FILHO <sup>4</sup> , 2014	4,47	3,51	2,08	1,14	13,42	12,57
LOBO <sup>5</sup> , 2008	5,56	4,56	2,86	1,86	16,67	15,67

**Fonte: Elaboração do Autor**

A grande diferença entre projeção de um autor, 7 anos à frente, e a realidade de outro autor com dados reais, sobre nitrogenados, é explicado pelos investimentos de novas plantas de nitrogenados no Brasil, aproveitando o potencial de gás natural do recém descoberto (em 2006) pré-sal. As ligeiras melhoras dos índices para fósforo e potássio provavelmente se devem a melhores práticas no manejo, à mecanização, ao uso de cultivar específicos, e à reciclagem de nutrientes. As referências relatam as quantidades usadas, não entram no mérito do aproveitamento agrícola.

A longo prazo (séculos), baseado na condição básica de falta de energia fóssil, a hipótese de trabalho aqui adotada é que os parâmetros e condições a serem atendidos para que uma energia seja realmente renovável, a critério do Autor, são descritos no Quadro 1-1.

**Quadro 1-1 Parâmetros para uma Energia Renovável**

Parâmetro	Descrição
Ausência de energia fóssil	Todo o ciclo de produção deve ser feito sem uso de energia fóssil. Toda energia necessária deve ser fornecida pela própria energia renovável.
Balanco energético positivo	O processo deve produzir mais energia que a energia requerida para sua produção e distribuição, incluindo energia indireta e embutida em insumos e seu transporte, além de manutenção e produção de equipamentos.
Balanco de CO <sub>2</sub> eq neutro	Teoricamente não deveria emitir mais CO <sub>2</sub> eq, porém se temos extração mineral para produção de insumos agrícolas, sempre tem a possibilidade de emissão de CO <sub>2</sub> eq durante a mineração, mesmo que a energia líquida seja positiva. O ciclo de produção de energia não deve levar ao acúmulo de CO <sub>2</sub> eq na atmosfera.

<sup>1</sup> Índices de consumo/produção e importação/produção são calculados pelo Autor a partir dos dados primários das duas Referências Bibliográficas

<sup>2</sup> Consumo dividido pela produção nacional

<sup>3</sup> Importação dividido pela produção nacional

<sup>4</sup> Com dados reais de 2011

<sup>5</sup> Com projeção para 2014

Área suficiente	Haver superfície terrestre suficiente para infraestrutura de captação de energia solar, produção de biomassa, facilidades industriais para produção da energia secundária, estrutura de movimentação ou transmissão da energia gerada atualmente. Em contraste, a energia primária fóssil (petróleo, gás natural e carvão mineral) não ocupam área superficial, é energia solar antiga armazenada em locais subterrâneos.
Insumos suficientes	A ausência de energia fóssil pode inviabilizar a importação de grandes quantidades de insumos agrícolas. Assim, as reservas minerais locais devem suprir a demanda de fertilizantes para a produção de biomassa.
Distribuição eficaz	Combustíveis líquidos tem a grande vantagem de possuir uma alta densidade de energia. O uso mais intensivo de eletricidade precisa de uma infraestrutura muito mais robusta para distribuição elétrica. O hidrogênio na forma líquida tem problemas extremos de distribuição, muito mais complexos que os de gás natural ou gás liquefeito de petróleo.
Manutenção da sociedade	Deve suprir a energia necessária para manter uma sociedade complexa e tecnológica como a atual
Velocidade de formação	Deve ser produzida na velocidade de consumo, em quantidade temporalmente estável

Fonte: Elaboração do autor

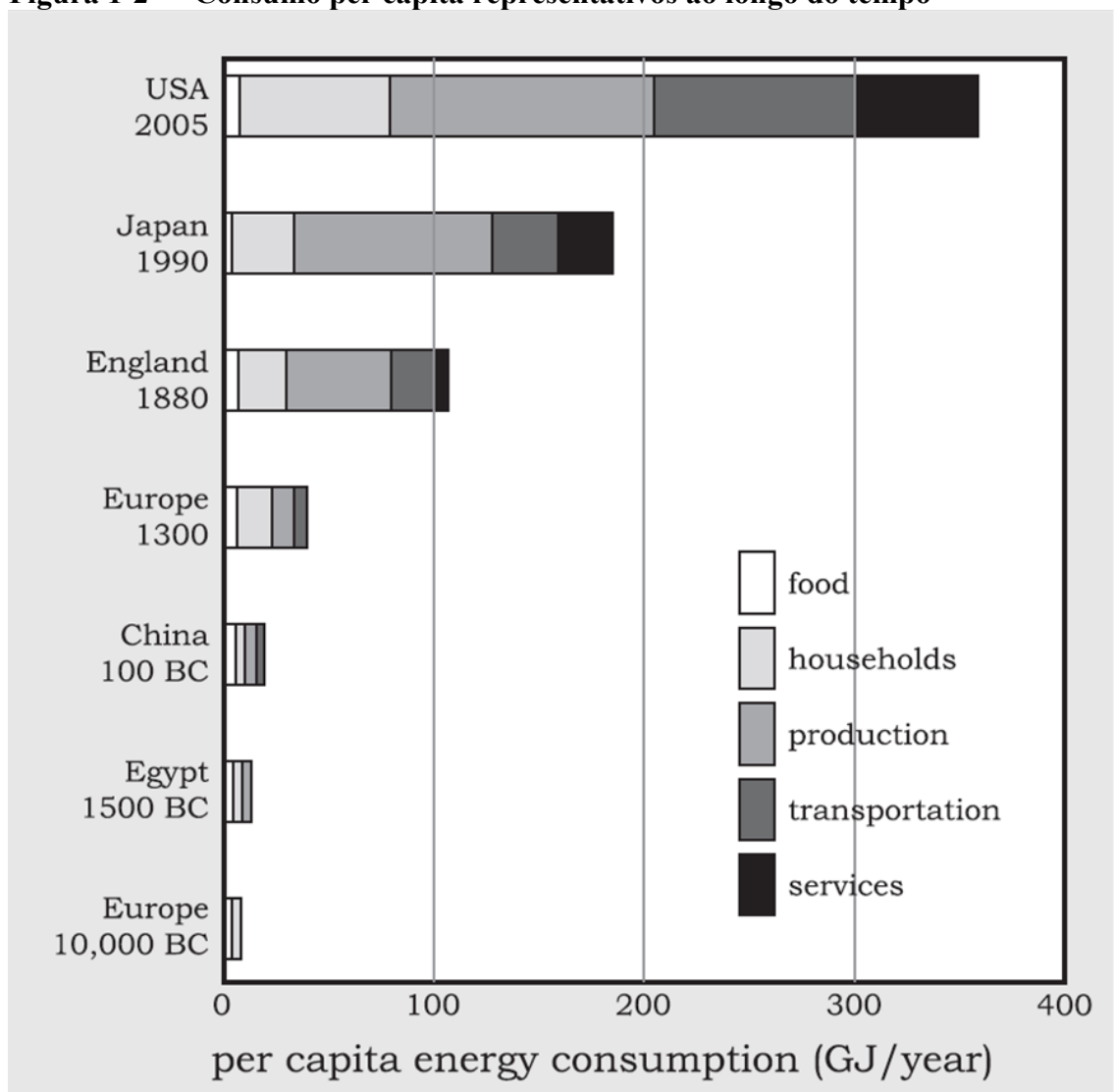
## 1.2 Energia fóssil e a bolha de consumo

A história da evolução humana pode ser resumida em duas palavras: transformação e energia. A espécie humana se distingue das outras espécies pela sua capacidade de modificar o meio ambiente, criar produtos novos, para seu maior conforto físico, para aumentar as suas possibilidades de sobrevivência, para produzir artefatos usando recursos naturais. Para isso é preciso energia, muita energia. O uso de fogo foi a primeira energia não biológica, permitindo conforto no frio, proteção parcial contra feras, e permitindo maior variedade de comidas.

Progresso humano e população era limitado basicamente pela disponibilidade de energia, que nas eras primitivas era basicamente biomassa vegetal e animal. Depois da descoberta do fogo, florestas eram dizimadas para conseguir madeira como fonte de energia. Com duas consequências: perda de fonte de biomassa como combustível, e perda de comida por perda de animais herbívoros. Foi a primeira limitação encontrada pelo consumo de energia a uma taxa maior que a lenta produção de biomassa vegetal (SMIL, 2010). Na era agrícola, de subsistência apenas, a energia armazenável era de 15

MJ/kg a 17 MJ/kg de biomassa nativa relativamente seca (secagem natural). Um ser humano consegue produzir cerca de 100W de potência (LANGER, 2006; FAO/WHO/UNU, 2001; BAHER, 2012; MEDEIROS, 2011; SALLA, 2009; SMIL, 2010; CHU, 2007), mas não de maneira contínua. Um animal de tração pode produzir perto de 500W (SMIL, 2010). Como nota histórica, um “cavalo vapor” é igualado a 735W, estimado usando um cavalo em esforço máximo por curto espaço de tempo. Ao longo da história antiga, antes da Revolução Industrial, foram sendo usados energia hidráulica (moinhos hidráulicos) e ventos (moinhos de vento).

**Figura 1-2 Consumo per capita representativos ao longo do tempo**



Fonte: SMIL (2010)

Conforme ilustrado na Figura 1-2 a intensidade de energia por pessoa cresceu muito lentamente em praticamente 12.000 anos, até o início da Revolução Industrial,

quando praticamente triplica o consumo, em apenas 130 anos, para aproximadamente um GJ/dia/habitante nos Estados Unidos (valor estimado a partir do gráfico da Figura 1-2, não sendo preciso, apenas ilustrativo). O índice correto para EUA moderno é de 793MJ/dia/habitante (IEA, 2015), ou seja, 290 GJ/ano/habitante.

Outro autor (KEAY, 2007) relata que na Europa pré moderna o consumo médio da sociedade era de 20MW, que resulta em um total de 631 GJ/ano. Adotando uma população de 100 milhões na Europa (CIPOLLA, 1976 pp. 25–71), resulta em um consumo de 12,7 MJ/pessoa/dia. Mesmo na Idade Média, cada pessoa já usava bem mais que a energia disponível com esforço humano apenas. Por isso conseguiam ter casas, construir ferramentas, ter roupas rudimentares. E principalmente, cozimento de alimentos e aquecimento no inverno.

**Tabela 1-4 Suprimento de energia moderna e biomassa tradicional**

Ano	EnergiaMod <sup>1</sup> (em TEP)	EnergiaBiom <sup>2</sup> (em TEP)	Pop <sup>3</sup> (milhões)	TEP/hab <sup>4</sup>	MJ/hab/dia <sup>5</sup>
1820	13	208	1.041	0,2123	24,34
1870	134	254	1.270	0,3055	35,02
1913	735	358	1.791	0,6103	69,95
1950	1.625	505	2.524	0,8439	96,73
1973	5.369	674	3.913	1,5443	177,03
2003	9.579	1.114	6.279	1,7030	195,21

**Fonte: KEAY (2007)**

A Tabela 1-4 mostra a evolução do uso de energia fóssil (KEAY, 2007) combinando carvão (a partir de 1870) com petróleo e depois com gás natural. O total anual de 1,71 TEP/hab equivale a um consumo de 196 MJ/habitante/dia. Em comparação, no ano de 1820, foram consumidos apenas 24,1MJ/habitante/dia. A relação numérica não conta toda a história, pois a eficiência do uso da energia melhorou muito nos dois últimos séculos. Portanto, o trabalho mecânico disponível aumentou muito mais que a simples relação de intensidade de energia por pessoa.

O uso do carvão como energia fóssil antecedeu por dois milênios o uso de petróleo e gás natural, com registros de seu uso na China (SMIL, 2010). Em meados de 1800, a Inglaterra começou a utilizar intensivamente o carvão mineral, estimulando o

<sup>1</sup> Energia tipo moderna, ou seja, energia acumulada pela natureza e usada em uma taxa não renovável. Por exemplo turfa, carvão, óleos.

<sup>2</sup> Energia advinda de uso de vegetais nativos, tração animal. Não está claro na referência se a energia da alimentação está contabilizada como energia de biomassa, nem se contabiliza energia humana.

<sup>3</sup> População mundial estimado em milhões de habitantes

<sup>4</sup> Energia consumida anualmente por habitante em TEP Tonelada Equivalente de Petróleo

<sup>5</sup> Energia convertida em MJ/hab neste trabalho

início da revolução industrial, com uso principal na área têxtil, transporte a vapor e siderurgia. Na mesma época, começou-se o uso intensivo de petróleo e gás natural pelo mundo. Nesse momento, o mundo tinha energia abundante e barata, facilmente transformável em combustível conveniente para transporte, energia, aquecimento e a nascente indústria petroquímica. Consumindo a poupança energética de milhões de anos como se as reservas fossem inesgotáveis. O uso do petróleo e do gás natural elevou muito o padrão de vida material, permitindo uma economia global e sustentando uma sociedade altamente tecnológica baseada em informações e serviços. Passamos de um intensidade energética de 3,6 MJ por pessoa por dia na época pré-histórica (FARIAS, 2011), para 793MJ por pessoa por dia nos Estados Unidos em meados da década de 2010 (IEA, 2015).

**Figura 1-3 Consumo em GJ/habitante/ano ao longo da história recente.**

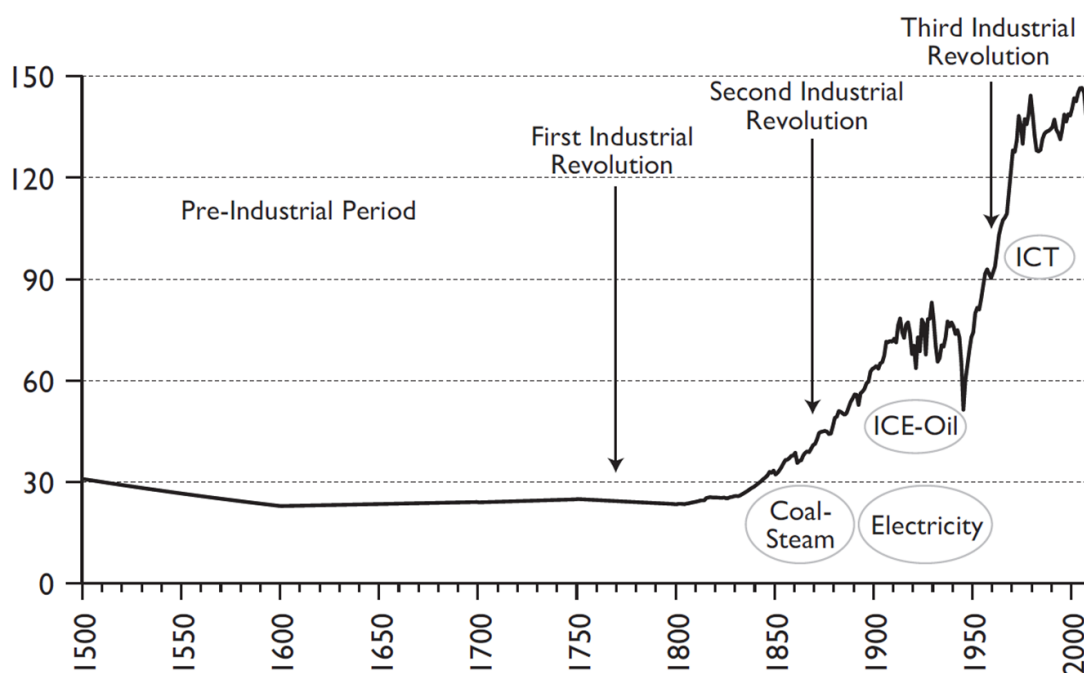


Figure 1.2. Three industrial revolutions and four development blocks  
*Source:* See [www.enervehistory.org](http://www.enervehistory.org).

**Fonte: CHU (2007)**

A Figura 1-3 mostra a intensidade de energia ao longo do tempo. O eixo das ordenadas apresenta o consumo anual per capita de energia (em GJ/habitante/ano), na Europa (PRINCENTON UNIVERSITY, 2010). 150 GJ/habitante/ano equivalente a 411 MJ/habitante/dia, no ano de 2000. A primeira revolução industrial ocorreu com uso intensivo de carvão mineral e uso desta energia em produção de metais, principalmente

ferro e suas ligas. A segunda revolução industrial foi o início de uso de petróleo e uso incipiente de eletricidade, além da invenção do ICE<sup>1</sup> (Internal Combustion Engine), o motor de combustão interna em substituição ao motor a vapor. As grandes oscilações de consumo foram devido às crises econômicas e sociais da Crise de 1929 e da Segunda Guerra Mundial, seguido por um grande crescimento industrial, sociedade de consumo e eletrificação maciça desde o fim da Segunda Guerra. O consumo específico seria maior ainda se não fosse um aumento de eficiência energética ao longo da terceira revolução industrial. Por outro lado, o aumento vertiginoso de novos produtos eletrônicos, nem sempre indispensáveis, tem alimentado um aumento de consumo de eletricidade. Além da energia necessária para produção de produtos de alta tecnologia porém descartáveis.

Embora não seja explícito, o consumo total de energia mundial também está aumentando, acima do aumento de consumo específico de energia por habitante. Primeiro por causa do crescimento populacional. Cada pessoa viva consome energia, mesmo a nível de subsistência. Segundo, à medida que um país vai melhorando o seu nível econômico, vai aumentando o consumo de produtos por habitante, e portanto, aumenta a intensidade de energia por pessoa. Felizmente, com o aumento da tecnologia e medidas conservacionistas, a intensidade de energia na Economia (medido em MJ/dolar de PIB equivalente) tende a diminuir.

A energia fóssil é finita, é uma herança de energia solar em escala geológica. Com o consumo intempestivo atual, é previsto que o seu fim será nos próximos um a dois séculos (HALL, 2011; HALL, 2009; SIMS, 2006; CHEN, 2011; CLEVELAND, 1992; MARCOCCIA, 2007). A bolha de consumo de energia fóssil está para estourar, com todas as consequências de abstinência de consumo.

### **1.3 “Peak Energy” já passou**

Em 1977 o presidente americano, Carter, alertou que, a menos que sejam adotadas medidas drásticas de conservação de energia, seu país enfrentaria uma catástrofe nacional (WIRTH, 2008). A advertência não repercutiu com a importância devida, talvez por interesses econômicos. Usando 793MJ/habitante/dia nos Estados

---

<sup>1</sup> ICE Intenal Combustion Engine, um motor em que a energia é fornecida pela combustão interna do combustível. Em contraponto ao motor de combustão externa, onde a energia é transferida por um fluido de trabalho ao motor, como em um motor a vapor.

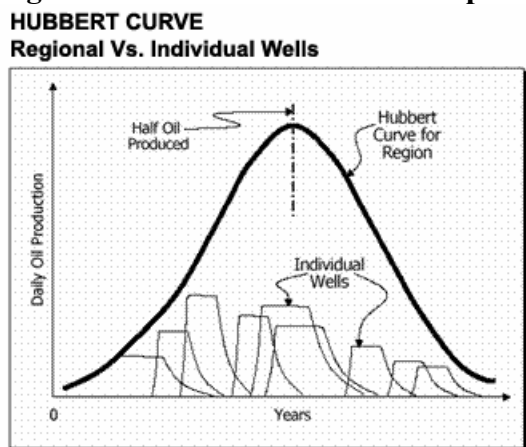


Unidos no início do século 21, a energia viabiliza produção industrial, transporte, construção civil, cimento, aquecimento, resfriamento, movimentação de produtos globais (incluindo comida), enfim, garante o emprego e o estilo de vida do século 21. Além disso, petróleo e gás natural são a matéria-prima para a vasta indústria petroquímica. É impossível viver sem plásticos diversos, sem gás natural para produzir fertilizantes nitrogenados para a agricultura. Sem a petroquímica, a agricultura industrial está em perigo, e portanto, a segurança alimentar está ameaçada. Em 2007 a preocupação voltou, e a Academia Nacional de Ciência americana, sob encomenda do governo americano, efetuou um novo estudo (MARCOCCIA, 2007) agora confirmando que o “peak oil” realmente está ocorrendo, e suas consequências de longo prazo. A principal conclusão é que toda a energia “renovável” produzida nos EUA equivale a apenas 1% do consumo total, com projeções otimistas para repor 4% do total em 2015. No Brasil, em 2015, E1G equivale a apenas 4,7% das necessidades energéticas de 2014 (cálculo do autor, com dados de CONAB (2016a) e EPE (2015)).

“Peak oil”, por definição, é o fenômeno temporal onde aproximadamente metade do petróleo já foi consumido. Este período é estimado em períodos desde meados de 2000 até 2040. (GAO – USA, 2007; WIRTH, 2008). Esta variação é decorrente da adoção por diferentes organizações de pesquisa (USGS, GAO, EIA, IEA, WORLD BANK, etc), de metodologias diversas sobre estimativas de reservas prováveis e possíveis. A taxa de descoberta de novas reservas está diminuindo, e a produção está aumentando vegetativamente. Ao redor da década de 2000, está ficando evidente que o decréscimo de novas descobertas já está sendo maior que o avanço do volume de produção usando novas tecnologias, mais caras, para extrair o máximo possível de reservas comprovadas e prováveis. Não significa que o petróleo vai acabar súbitamente. O que significa é que está acabando a era de energia abundante e barata (WIRTH, 2008). As novas tecnologias de extração são bem mais onerosas por barril de petróleo, e as novas descobertas são geralmente em alto mar, como no pré-sal brasileiro, onde a perfuração e a extração são várias vezes mais caras que a extração na mesma profundidade em terra firme. Além de serem financeiramente mais onerosas, energia fóssil extraída em áreas profundas em oceanos, tem um EROI muito menor que os poços de energia fóssil em terra firme, devido à extração em águas ultraprofundas, e o transporte por meio de navios tanque até um porto para finalmente ser bombeado. Em algum ponto no tempo, uma bacia petrolífera chega a um EROI de 1,0 e torna-se

energéticamente inviável, apesar de ainda ter energia fóssil não extraída. Neste caso, toda a energia útil extraída é usada para extração da energia..

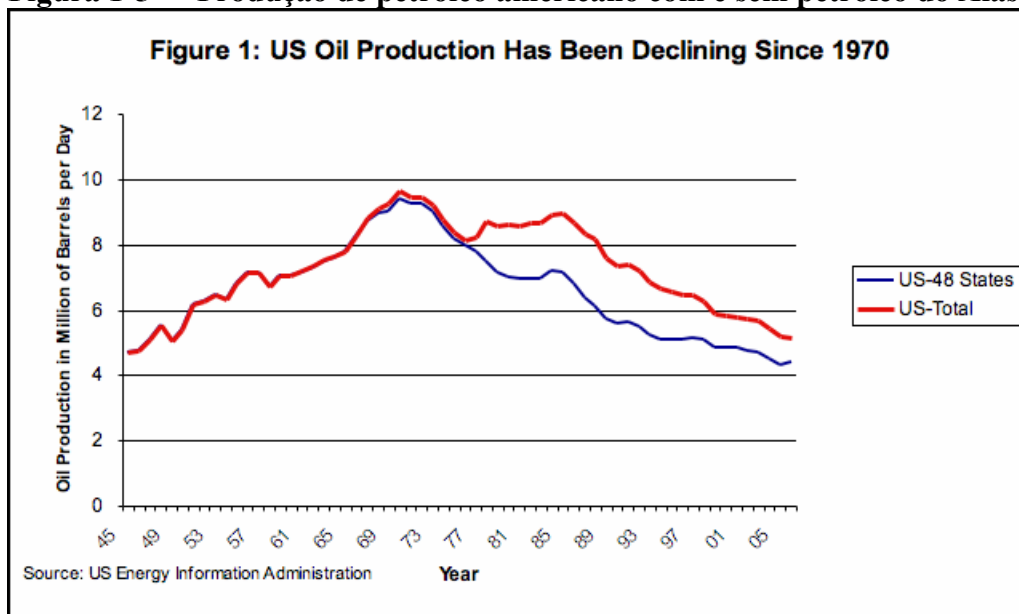
**Figura 1-4 Curva de Hubbert : produção individual e coletiva em Peak Oil**



**Fonte: WIRTH (2008)**

A Figura 1-4 ilustra de forma clara o conceito. A cada ano que passa, o número de poços novos em uma bacia produtora vai aumentando até um pico, depois vai diminuindo a quantidade anual. Cada poço individualmente tem um período de produção até seu esgotamento econômico ou técnico. A soma total produz uma curva com um máximo de produção, e depois vai diminuindo progressivamente, até que a longo prazo, a produção não seja mais significativa como fonte energética. A Figura 1-4 é a clássica Curva de Hubbert, o primeiro pesquisador que deu ampla publicidade ao fenômeno denominado de “peak oil” em 1956.

**Figura 1-5 Produção de petróleo americano com e sem petróleo do Alasca**



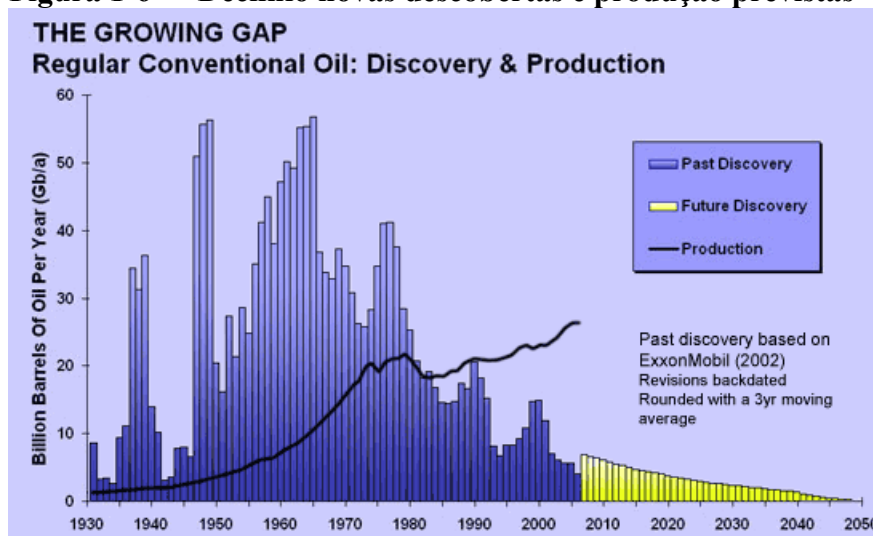
**Fonte: WIRTH (2008)**

A Figura 1-5 ilustra o mesmo conceito a partir de dados da produção de petróleo dos Estados Unidos, incluindo o petróleo produzido no Alasca. A produção total está declinando ao longo dos anos, de meados de 70 até meados de 2000. O declínio da produção americana foi um acontecimento geopolítico que foi um dos fatores para as várias crises de petróleo das décadas de 70, 80 e 2000 (WIRTH, 2008). Apesar do uso de “shale oil” (óleo de xisto) na última década, que conseguiu diminuir o preço do barril de petróleo no mundo, o que realmente mantém o preço do petróleo baixo é a crise econômica mundial de 2008, cujos efeitos persistem até agora em 2016. E se a falta de energia barata afeta negativamente a economia americana, afeta negativamente a economia global, inclusive a brasileira.

A Figura 1-5 não reflete a inclusão do “shale oil”<sup>1</sup> extraído com tecnologia “fracking” e perfuração horizontal. Esta nova forma de extração de energia fóssil aumentou a produção doméstica e diminuiu a importação, deprimindo com isso o preço do barril de petróleo mundial. Ainda não existem estimativas confiáveis da duração desta influência do “shale oil”.

<sup>1</sup> Shale Oil é o óleo existente nas rochas primárias, que com o tempo vão migrando óleo e gás aos poucos para os reservatórios naturais que são explorados com tecnologias conhecidas há mais de um século. Portanto, estamos “antecipando” um óleo e gás que levaria ainda muitos séculos para se acumular nos mesmos reservatórios já existentes.

**Figura 1-6 Declínio novas descobertas e produção previstas**



**Fonte: WIRTH (2008)**

A nível mundial, Figura 1-6 mostra a projeção para descobertas e produção. Mesmo as diversas descobertas de novas reservas gigantes como pré-sal brasileiro e africano, não melhoram muito o quadro, pois a sua extração em alto mar, a uma profundidade de 7 a 9 quilômetros abaixo do nível do mar, aumenta muito o custo, tanto financeiramente como energeticamente.

Não importa quando, mas o conceito de “peak oil” é agora considerado um fato aceito na literatura. O mesmo tipo de estudos e gráficos servem para o “peak gas” para gás natural. Quanto ao carvão, o mundo tem ampla reserva e baixa demanda. Estas reservas provavelmente poderão ser utilizadas para os próximos séculos. Contudo, problemas de poluição ambiental estão associados ao seu uso, além de não ser uma forma conveniente de energia como combustíveis líquidos e gasosos. Também, na tecnologia em uso, não é normal usar carvão mineral como fonte física para substituição da petroquímica.

A restrição energética pós “peak oil” e “peak gas” se traduz em restrição econômica, que implica restrição ao bem estar geral e padrão de vida de cada habitante do mundo. Mas em especial nos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, como Brasil. Embora o Brasil tenha uma matriz energética mais renovável que a média mundial, não é um país isolado do mundo, nem economicamente, nem em produtos necessários no dia a dia. O fim da era de energia barata tem impactos muito mais rápidos que o fim propriamente dito da energia fóssil. O reflexo econômico na sociedade brasileira será sentido muito antes do esgotamento total de energia fóssil.

## 1.4 Sociedade sem energia fóssil

Sem energia fóssil, a continuidade da sociedade brasileira como se conhece dependerá de um tripé a ser atendido: energia suficiente para manter a sociedade, custo razoável da energia para manter a economia estável, e substituição da petroquímica pela alcoolquímica ou algum outro biomassa-equivalente.

Já foi apresentado que o consumo de energia fóssil ocorre a uma taxa muito superior à taxa de formação da energia, e que a sociedade tecnológica atual só é possível com um consumo extremo de energia por pessoa por dia. Ao redor de 170 MJ/habitante/dia no Brasil (EPE, 2015), e ao redor de 793 MJ/habitante/dia para EUA (IEA, 2015). Manter esta intensidade de energia, só com biocombustíveis renováveis, é uma proposição arriscada, para dizer o mínimo. Não é garantido que haja terra suficiente, insumos agrícolas e infraestrutura para produção de biomassa renovável. Nem que haverá área suficiente e condições ambientais como insolação e ventos perenes para produção de energia solar fotovoltaica e eólica para complementar a energia de biomassa. Enfim, não se tem garantia de manutenção da civilização atual, com seu nível de consumo material atual, a longo prazo, daqui a uns dois séculos.

A melhora de eficiência energética poderá ajudar, a eficiência tem melhorado ao longo de todo o século 20 (HALL, 2011; CHU, 2007), mas não o suficiente para compensar as outras causas de aumento de consumo de energia. A grande esperança é que com melhoria de tecnologia, com novas medidas de conservação, com novos padrões de construção, com novas restrições de mobilidade urbana e até interurbana, possam diminuir bastante a intensidade de energia por habitante por dia.

Falhando estas alternativas, e não se concretizando novas formas revolucionárias de energia, como fusão nuclear, tem-se duas alternativas: diminuir o consumo de produtos industrializados e alimentos não locais, e/ou manter a população dentro de limites sustentáveis do Brasil.

## **1.5 Sociedade sem petroquímica**

Como se não bastasse todos os problemas e restrições levantados até agora, é necessário lembrar que praticamente toda a civilização moderna está baseado em subprodutos de petroquímica. Plásticos em geral para consumo no dia a dia, principalmente para embalagens e preservação de alimentos, tecidos sintéticos, plásticos de engenharia que está substituindo metais em muitas aplicações onde peso é importante, coque de petróleo, asfalto, gás natural para produção de nitrogenados indispensáveis para produção de comida e biomassa para energias “renováveis”, tintas e vernizes para proteção estrutural (baseados em petróleos), solventes industriais...A lista é imensa, mas os itens já listados mostram que sem petroquímica, é necessário desenvolver toda uma nova tecnologia para produção de produtos iguais ou semelhantes, usando provavelmente etanol ou alguma outra biomassa como base molecular. Esta dissertação não inclui a produção da biomassa extra como insumo básico para produção de substitutos de produtos da petroquímica. Talvez toda a futura produção de biomassa brasileira seja direcionada exclusivamente para alcoolquímica em substituição à petroquímica.

## **1.6 Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação é verificar se o etanol da primeira geração (E1G), produzido a partir da cana-de-açúcar em ambiente brasileiro, é absolutamente sustentável sem energia fóssil. Ou seja, verificar se é possível obter mais energia que a energia total investida na sua obtenção, o que inclui não só a energia gasta na produção da biomassa e na produção de etanol, mas também toda a energia necessária para manter a infraestrutura tecnológica utilizada na produção e manutenção de todos os equipamentos agrícolas, veículos de carga, e insumos agrícolas e químicos industriais.

Como objetivo secundário, é avaliada a necessidade de recursos, incluindo terra e insumos agrícolas, para suprir toda a necessidade energética brasileira tomando-se como referência o ano base de 2014. Se não puder suprir por falta de terra ou outros insumos, determinar qual é a intensidade de energia possível só com E1G para a economia brasileira

Outro objetivo secundário é garantir uma base de dados primários e secundários confiáveis que sirvam de base para futuros estudos complementares, e minimizar a dispersão de resultados. Nesse estudo, os dados primários foram verificados, registrando-se os valores máximos e mínimos relatados na literatura (quando existem dados confiáveis de vários autores). O valor adotado no estudo foi tecnicamente justificado, ou é adotado por ser um valor confiável relatado por um único autor. Os detalhes do valor adotado são encontrados nos Apêndices nas seções 7-1 e 7-2. Descrições de infraestrutura é encontrado nas outras seções do Apêndice. Os dados secundários são recalculados com a metodologia proposta nesse trabalho e as equações são explicitadas em apêndices, o que permite a reprodutibilidade de cada dado secundário.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

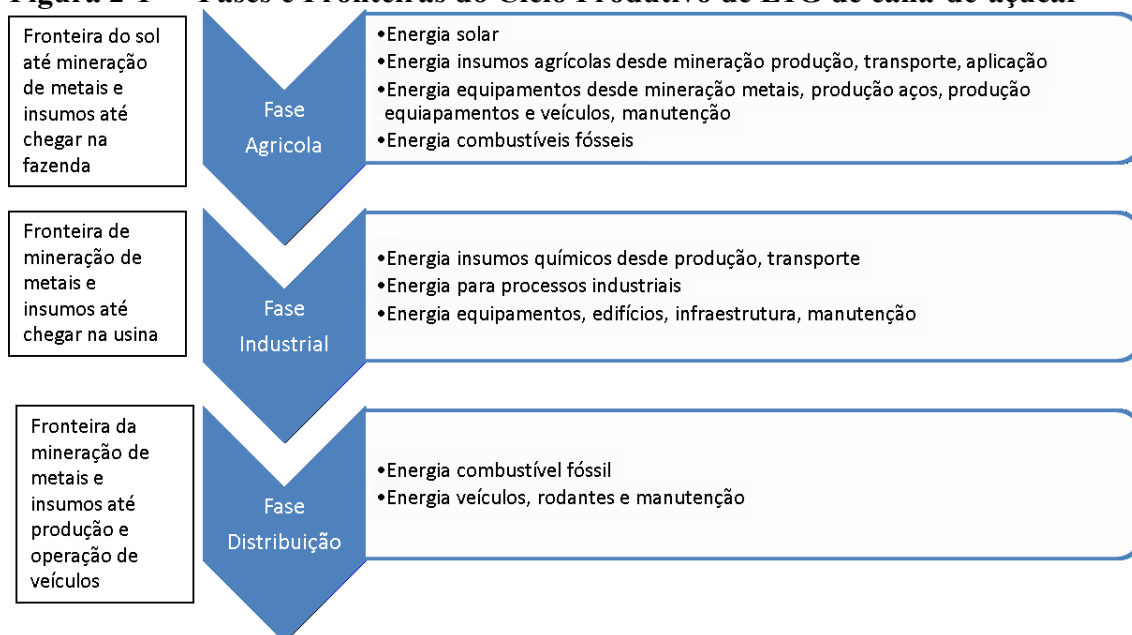
A revisão bibliográfica realizada busca apresentar informações sobre o tema, fontes de dados, e conclusões de outros pesquisadores sobre temas semelhantes. Também evidencia as lacunas científicas que motivam a realização deste estudo.

Foi constatado que a energia indireta é normalmente não contabilizado, fato que eleva muito o valor do EROI calculado. Além disso, o uso de energia fóssil estava implícito nos custos financeiros mas não explicitado nos indicadores de sustentabilidade. Energia indireta de movimentação de adubos e outros insumos agrícolas sequer eram contabilizados.

Para uma avaliação mais precisa de sustentabilidade, foi tomada a decisão de simular o cenário de muito longo prazo, sem subsídio de energia fóssil abundante e de baixo custo. Este cenário obriga a estender as fronteiras do sistema até a origem de toda a cadeia produtiva de insumos, equipamentos e infraestrutura, além da energia envolvida diretamente na cadeia produtiva, incluindo a movimentação de insumos e produtos.

A Figura 2.1 ilustra as fases e fronteiras do ciclo produtivo do etanol de primeira geração (E1G).

**Figura 2-1 Fases e Fronteiras do Ciclo Produtivo de E1G de cana-de-açúcar**



**Fonte: Elaboração do Autor**



Os dados coletados de referências bibliográficas foram divididos em Dados Primários (dados usados diretamente sem manipulação matemática, dados fundamentais) e Dados Secundários (dados derivados de outros dados tanto Primários como Secundários). Os resultados e conclusões foram divididos em dados numéricos de subtotais e indicadores de sustentabilidade.

Como foi constatado, uma grande variação dos dados levantados para um mesmo insumo ou atividade, especial cuidado foi usado na verificação dos dados primários, e os dados secundários necessários foram recalculados com metodologia explicitamente documentada.

## 2.1 Escopo do Estudo

O cenário fundamental para este estudo é o fim de todo e qualquer fonte de energia fóssil a longo prazo, dentro de um a dois séculos. Atualmente utiliza-se energia fóssil a uma taxa de pelo menos 500.000 vezes maior que sua taxa de formação. Foram necessários de 50 milhões de anos até 250 milhões de anos para a formação do gás natural, petróleo e carvão mineral. Em aproximadamente 150 anos de uso intensivo, já foram consumidos metade das reservas conhecidas, conforme seção 1-3. A Tabela 2-1 resume as reservas e consumos recentes, além de uma estimativa de vida útil das reservas (BP, 2017).

**Tabela 2-1 Estimativa de vida útil para Reservas Comprovadas**

	Reserva <sup>1</sup>	Consumo <sup>2</sup>	VidaÚtil <sup>3</sup>
<b>Petróleo</b>	<b>240,7</b>	<b>4.418,2</b>	<b>54,5</b>
<b>GN</b>	<b>170,7</b>	<b>3.204,1</b>	<b>53,3</b>
<b>Carvão</b>	<b>797,5</b>	<b>3.732,0</b>	<b>213,7</b>

Fonte: BP (2017)

As estimativas de reservas comprovadas no início do século 21 são da ordem de 240,7 mil MTEP, 186,6 trilhões de m<sup>3</sup> de gás natural (equivalente a 170,7 mil MTEP), e 1,139331 trilhões de toneladas de carvão (equivalente a 797,5 mil MTEP) (BP, 2017).

<sup>1</sup> Reserva Comprovada, portanto a estimativa mais conservadora

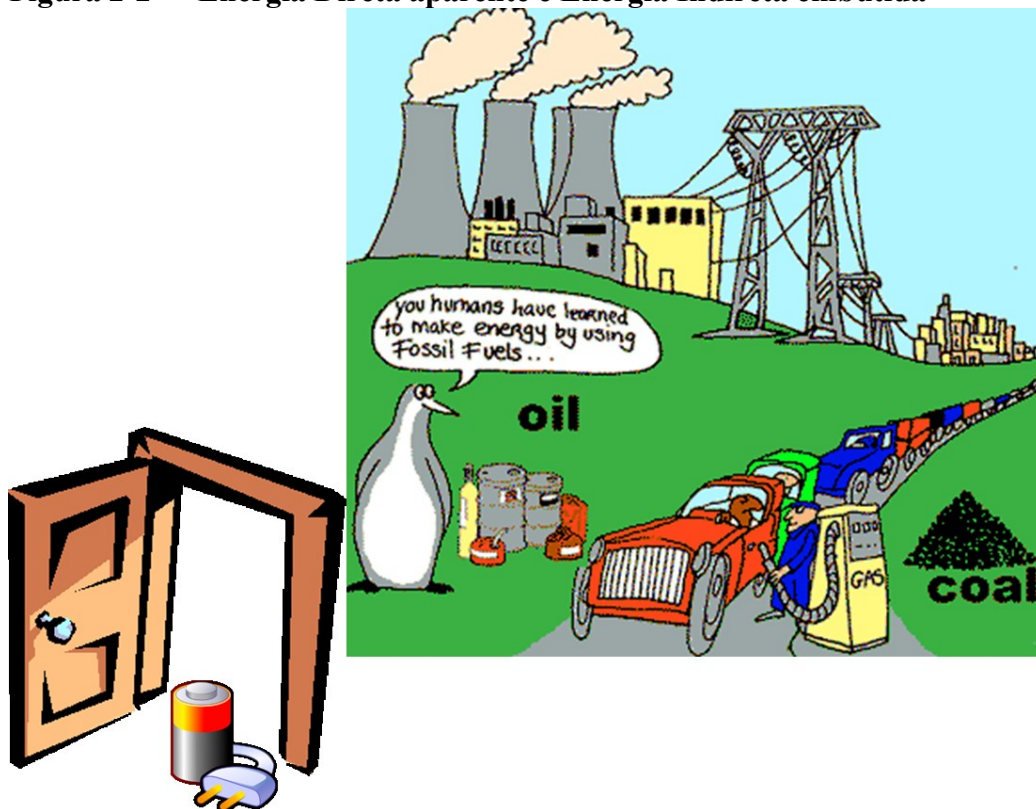
<sup>2</sup> Consumo do ano base 2016 segundo referência (GP, 2017)

<sup>3</sup> Estimativa de anos de consumo mantido a taxa atual e sem mudanças de tecnologia de extração

A mesma referência relata consumo de 4.418,2MTEP de óleo, 3.204,1MTEP de gás natural, e 3.732,0MTEP de carvão. Estes números conduzem a cerca de meio século para acabar petróleo e gás natural, e cerca de 2 séculos para acabar carvão. A energia nuclear também é finita, e não pode ser renovada de maneira eficiente a partir da energia solar.

Uma vez esgotada a energia fóssil, toda a energia necessária para manter a sociedade tecnológica atual, terá que vir de energias renováveis. Atualmente, a ênfase é no estudo de energias consideradas sustentáveis pela baixa emissão de CO<sub>2</sub>eq, sendo praticamente ignorada a energia embutida na produção e manutenção de toda a infraestrutura tecnológica para a produção de energia, seja fóssil, seja de biomassa, seja solar direta ou indireta. Sem uso de energia fóssil, a emissão de CO<sub>2</sub>eq é um indicador irrelevante, pois todo o CO<sub>2</sub>eq já foi emitido. Devido a essa visão, normalmente as fronteiras destes estudos limitam-se a um pedaço específico da cadeia produtiva. Os estudos não avançam a fronteira para o início da produção de insumos e equipamentos. A energia embutida nesses casos é expresso no preço, mas não explicitada no balanço energético. Como a Figura 2-2 ilustra, por trás de uma fonte de energia aparentemente simples como uma bateria, existe uma complexa infraestrutura industrial e tecnológica para a sua produção e disponibilização ao consumidor final. O uso e manutenção desta infraestrutura invisível consome muita energia indireta, que normalmente não é contabilizada na maioria dos estudos sobre energias consideradas sustentáveis.

**Figura 2-2 Energia Direta aparente e Energia Indireta embutida**



**Fonte: Elaboração do Autor**

Neste cenário, sem energia fóssil e sem fusão nuclear, que fonte de energia primária estará disponível? Além da tradicional energia hidráulica (moinhos de água e hidrelétricas), ainda existe energia de biomassa, a solar fotovoltaica, o calor solar concentrado, a solar indireta eólica. Cada forma de captura de energia solar tem a sua cadeia produtiva, com insumos que exigem muita energia para a sua produção, manutenção e entrega no local de produção energética. Toda essa energia usada para manter a infraestrutura terá que vir da própria energia primária produzida. Por isso, tem-se que estender a fronteira até a origem de todos os insumos, produtos e serviços necessários.

Para levantamento de dados da literatura, englobando a energia total usada desde a solar até o produto entregue ao consumidor final, foi necessário rever a literatura não só dos processos da cadeia produtiva, mas também estender as fronteiras para o início da cadeia produtiva de cada insumo usado nas três fases do ciclo produtivo completo.

Outro cuidado adotado é a interpretação criteriosa de trabalhos existentes. Alguns autores não só não acrescentam dado primário novo, como muitas vezes perpetuam dados com erros de outros autores, sem verificação de confiabilidade dos

dados relatados. Outras vezes, autores usam os dados numéricos de referências, sem atentar para o contexto experimental ou teórico, resultando em uso incorreto do dado e portanto, conclusões incorretas. Um exemplo recorrente é o uso de dados globais de usinas de etanol, tipo anexas a usinas de açúcar, onde o total de etanol produzido é real, mas não discriminam que inclui uma grande quantidade de etanol derivado do melaço<sup>1</sup> residual da usina de açúcar, inflando assim a produtividade industrial do etanol de para uma usina autônoma. (NOGUEIRA, 2008; MUTTON, 2012; MACHADO, 2012) isso é detalhado na seção 2-11. Cuidado especial foi dedicado a verificar a fonte primária dos dados resumidos e relatados em trabalhos na literatura, tanto em valores como o contexto adequado. Um exemplo de erro contextual é usar os melhores valores obtidos em condições de laboratório como valores médios para um parâmetro ou dado.

## 2.2 Metodologia de Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi elaborada tomando como base quatro objetivos: (1) o entendimento do ciclo produtivo completo do etanol de primeira geração (E1G), (2) a coleta de dados primários<sup>2</sup>, (3) a confirmação de dados primários<sup>3</sup> e recálculo dos dados secundários<sup>4</sup>, e (4) o estudo da metodologia usada pelos autores das referências para fins de contextualização dos dados numéricos.

Como a fronteira é muito ampla, o ponto onde começar a pesquisa é irrelevante. À medida que é detalhado um tópico pesquisado, cada dado “primário” é pesquisado e

---

<sup>1</sup> Melaço não é melado. Segundo ANVISA, Melado é o xarope resultante da evaporação do caldo da cana-de-açúcar, contendo todos os nutrientes do caldo integral. Melaço é o caldo resultante da centrifugação do açúcar, em usinas de açúcar. Melaço é um material bem mais pobre em nutrientes, geralmente usado como ração para gado ou como caldo para produção de etanol em usina anexa

<sup>2</sup> Dado Primário é aquele dado que é usado como dado para cálculo de outros dados. Geralmente são dados levantados diretamente no processo, ou dados tabelados, ou dados definidos por um fornecedor de equipamento, ou mesmo estabelecido por legislação pertinente. Como exemplos, consumo de um veículo, fator de conversão de energia, PBT (Peso Bruto Total) para uma categoria de veículo de carga. Note que o dado primário para um processo pode ser o resultado, ou dado secundário de processos anteriores na cadeia produtiva

<sup>3</sup> Normalmente a confirmação dos dados primários são feitos com verificação de consistência (como comparação com outras atividades semelhantes), comparação com eficiências energéticas e termodinâmicas de processos e atividades conhecidas, e em alguns casos, detalhamento do processo produtivo de um insumo e recálculo teórico da energia necessária para produção do insumo ou produto

<sup>4</sup> Dado Secundário é aquele dado que é calculado a partir de Dados Primários em um determinado processo ou atividade. Com dados primários verificados e confiáveis, e metodologia explícita, os dados secundários passam também a ser confiáveis. Nesta dissertação, dados secundários são recalculados, não são referenciados a partir de outros autores.

confirmado se realmente é um dado primário. Se não for, a fronteira é ampliada para levantamento de dados usados para o cálculo deste dado não primário. Por exemplo, a energia indireta em um quilograma de liga ferrosa varia de 20 a 60 MJ/kg, dependendo do autor. Os valores menores normalmente só consideram a energia de transformação do minério de ferro já beneficiado para aço simples. Os valores maiores normalmente incluem a transformação do ferro gusa ou aço simples em aços específicos (inoxidável, alta resistência, forjado, etc). Uns poucos estudos consideram a energia direta da mineração do minério de ferro e seu beneficiamento e concentração. Normalmente os estudos ignoram a energia indireta embutida nos equipamentos usados na mineração e beneficiamento, como escavadeiras, caminhões ultra pesados, trituradores de minério, eletroímãs para separação magnética, fornos de sinterização, etc. Também normalmente ignoram a energia para transporte do minério beneficiado a longa distância, muitas vezes transcontinentais, e muito menos contabilizam a energia das locomotivas, vagões e navios usados para transporte em grande volume. A fronteira da pesquisa foi ampliada até a mineração do minério de ferro para chegar a um valor com embasamento. Os valores de energia indireta para aços variam bastante dependendo do processo de produção e especificidades da liga. O valor final está ao redor de 60 MJ/kg de aço simples. Se for forjado, com têmpera especial, e sofrer outros tratamentos contra corrosão, o valor pode triplicar, como no caso de metais específicos usados em motores de combustão interna e caixas de câmbio de caminhões pesados e tratores, e aços estruturais usados na indústria petroquímica e mineração (BOUSTANI, 2010; SULLIVAN, 2010; ZVI, 2015) . Outro exemplo é a energia necessária para a produção de adubos nitrogenados. A maioria dos autores só relata a energia direta usada na produção do nitrogenado, assumindo energia nula contido nos insumos. A energia do gás natural, usado em grande quantidade como fonte de hidrogênio, e a energia para obtenção do nitrogênio a partir do ar, é ignorada por quase todos os autores. Um autor (MENDES JÚNIOR, 2014) levou em conta a energia do gás natural e chegou a um valor quase igual ao dobro da média relatada na literatura. Detalhes da confirmação do novo valor de energia de nitrogenados está na seção 2-13.

As áreas de conhecimento pesquisados, devido à extensão da fronteira do sistema produtivo, vão de astrofísica, radiação solar, meteorologia, física da atmosfera, agricultura, nutrição da cana, processos produtivos de E1G de cana, cogeração, balanço energético planetário, logística e custeio, produção de metais, plásticos e pneus, produção de veículos e tratores, rendimento de tratores e veículos de carga,

termodinâmica, bioquímica de fermentação, produção de motores (energia embutida no processo), produção de insumos agrícolas (energia embutida nos adubos), produção de química fina (defensivos agrícolas), logística de calcário e gesso agrícola, logística de nutrientes NPK, e claro, balanço energético. Foi também estudado o custo energético de produção de petróleo e gás para determinar a real energia embutida em um litro de diesel, o que deu um balizamento para a energia embutida no E1G. A energia contabilizada como energia direta é a energia de queima do combustível fóssil. Sem surpresa, EROI de combustíveis fósseis é bem maior que EROI de energia renovável. Afinal, não é necessária a fase de produção do produto primário (petróleo ou gás natural ou carvão). Só se há a fase de extração (equivalente à colheita da cana) e refino (equivalente à fase industrial de produção de E1G). Mesmo a fase de distribuição tem rendimento melhor com combustíveis fósseis, pois a densidade de energia do combustível (aproximadamente 35 MJ/litro) é bem maior que a densidade de energia do etanol (aproximadamente 21 MJ/litro). Portanto usam-se menos veículos, menos energia para movimentar a mesma quantidade de energia até o consumidor final, dada as mesmas distâncias.

Mesmo levando tudo isso em conta, os valores primários levantados certamente estão subestimados. Os autores normalmente levantam os dados da produção local, quando muito incluem a energia de produção dos insumos necessários. Mas pouquíssimos se preocupam em incluir a energia indireta que é necessária para a produção e manutenção dos equipamentos e infraestrutura necessária para a cadeia produtiva toda. Não foi possível sequer o levantamento de dados confiáveis sobre a massa de equipamentos individuais na fase industrial de E1G, como caldeiras, moendas, geradores, etc. Quando muito temos valores agregados (MACEDO, 2004). Massas de veículos rodoviários, implementos agrícolas e tratores tem dados confiáveis a partir de catálogos de fabricantes. Também não foram encontrados valores confiáveis sobre equipamentos de movimentação de carga usado dentro da usina, como tratores, carregadeiras e caminhões usados internamente para movimentação e arrumação física de cana e bagaço. Só se encontrou um autor relatando dados operacionais de um duto de bombeamento de vinhaça entre a usina e a fazenda usuária, mas sem muitos detalhes sobre características físicas, como comprimento real, diâmetros, material, taxa de manutenção, etc. (MARQUES, 2009)

Ao procurar registrar sempre o valor máximo, o mínimo e o adotado para cada dado primário, fica evidente como o resultado final pode variar muito, dependendo do

valor a ser adotado. Alguns dados primários só tem o valor adotado, pois não foi encontrado mais de uma referência com valor confiável. Sempre que possível, o valor adotado é justificado com razões explícitas, nos Apêndices.

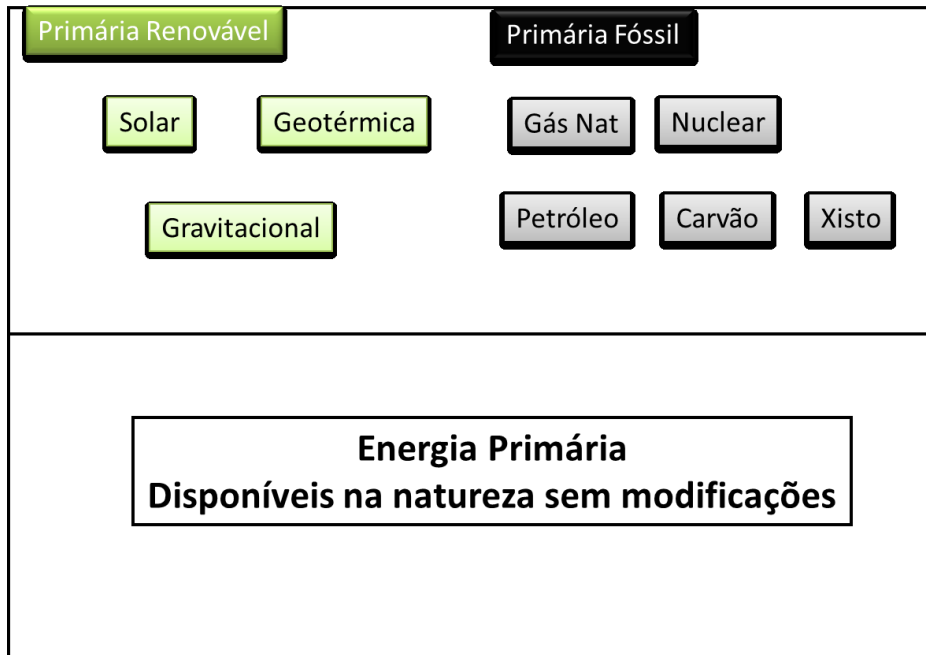
Energia em Larga Escala é um tema que tende a dominar os estudos nas próximas décadas ou no próximo século. O que é fóssil é finito. O que está em jogo não é a sobrevivência da raça humana, mas a sobrevivência de um estilo de vida, baseado em consumo extraordinário de energia fóssil a um custo irrisório. A Revolução Industrial é melhor expressa como a Revolução Energética Fóssil. A Revolução Verde que permitiu abundância de alimentos a custo baixo, permitindo a expansão da população de 2 bilhões para 7 bilhões em apenas 90 anos aproximadamente, só foi possível com uso intensivo de energia fóssil na forma de adubos agrícolas e mecanização da agricultura. Sem energia fóssil, certamente teremos limitações não só ao estilo de vida que temos hoje, início de século 21, como também a quantidade de alimentos disponíveis para a população existente hoje.

### **2.3 Classificação de Energias**

A energia possui diferentes classificações sob diversas óticas. Uma primeira divisão conceitual consiste em classificar a energia em Energia Primária e Energia Secundária (Figura 2-3). Energia primária é a energia encontrada na natureza, disponível para uso na forma natural. Como exemplos, temos lenha nativa, petróleo, gás natural, carvão mineral, minério radioativo, radiação solar. Normalmente uma energia primária não tem uma forma conveniente para uso tecnológico. Lenha nativa é a única exceção mas normalmente é usada em zonas rurais, em aquecedores ou fogões rústicos, com eficiência energética muito baixa. Radiação solar só pode ser empregada diretamente para o aquecimento de água. Geralmente é necessário transformar a energia primária numa forma mais conveniente de energia, que possa ser utilizada pela sociedade moderna. Nessa transformação, grande parte da energia primária é perdida.

Estritamente falando, material radioativo não é uma fonte primária de energia fóssil, é uma energia não renovável. A classificação de energia fóssil é reservado para energia primária composto de hidrocarbonetos.

**Figura 2-3 Energia Primária: Definição e exemplos**

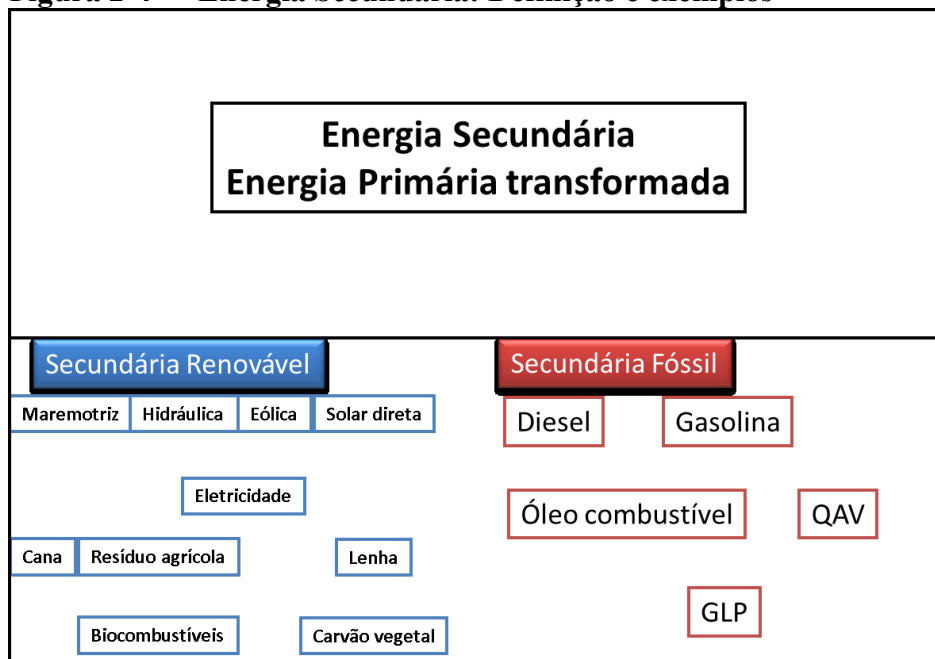


**Fonte: Elaboração do Autor**

Energia secundária, conforme ilustrada pela Figura 2-4, é a energia já transformada, a partir de fontes de energias primárias ou de outras de energias secundárias, para um formato conveniente para uso. Alguns exemplos de energia secundárias são: combustíveis líquidos (E1G, biodiesel, diesel, gasolina, óleo combustível) e eletricidade. Por problemas de produção e distribuição, os combustíveis líquidos tradicionais e eletricidade são as melhores apostas a médio prazo (entre 50 a 100 anos). Neste quadro, o E1G tem grande importância, tanto pela reabsorção parcial de CO<sub>2</sub> da atmosfera durante o ciclo de produção da cana-de-açúcar, como pelo uso imediato na sociedade tecnológica dentro de um horizonte visível. A longo prazo (50 a 150 anos) podem surgir novas tecnologias que permitam novas formas de energias secundárias, mais eficientes na sua produção como na sua aplicação.



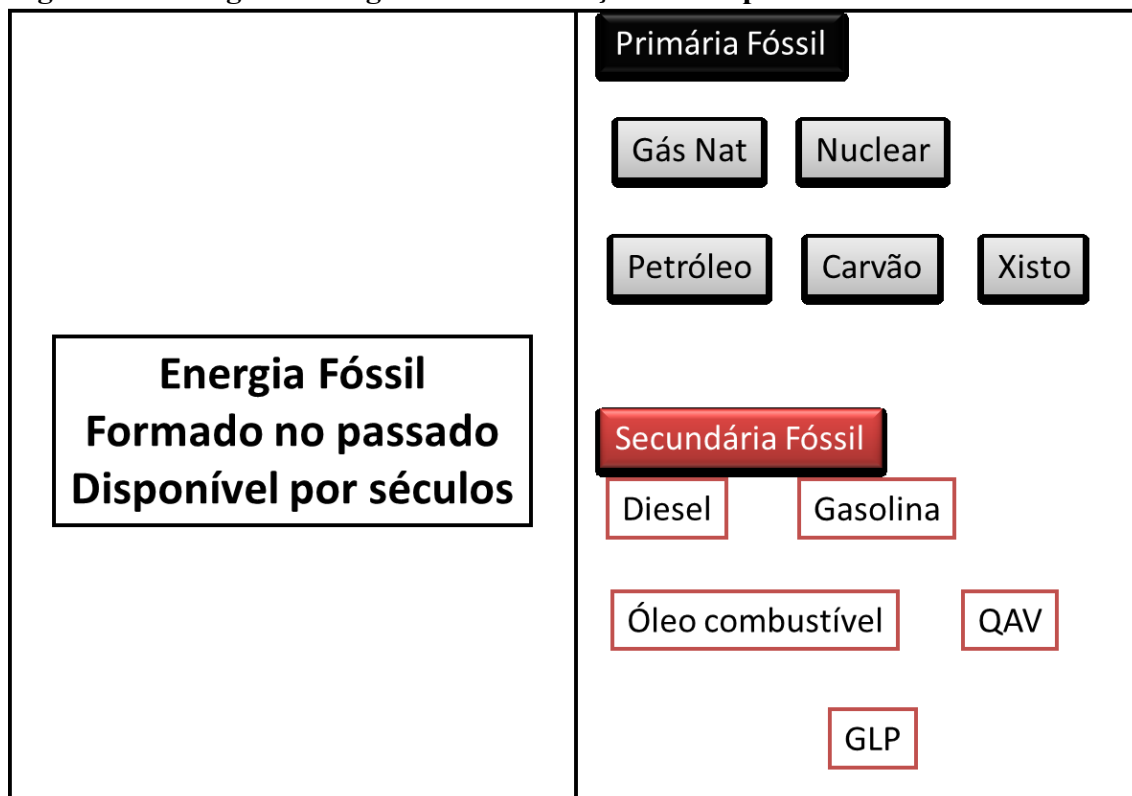
**Figura 2-4 Energia Secundária: Definição e exemplos**



**Fonte: Elaboração do Autor**

As energias fósseis, como ilustradas na Figura 2-5, são aquelas formadas em eras geológicas (dezenas a centenas de milhões de anos), e que uma vez consumidas, não podem ser repostas à mesma taxa de consumo. As energias fósseis mais tradicionais são as relacionadas com carboníferos (carvão, petróleo, gás natural) com teorias abiogênicas e biogênicas de formação. Apesar de alegarem rotas químicas diferentes, ambas as teorias concordam que precisa de tempos geológicos para a sua formação. Contém principalmente carbono, hidrogênio e oxigênio em uma mistura não padronizada. Além de traços de nitrogênio, enxôfre, e outros minerais. No fundo é energia gravitacional e energia solar convertida em energia química. Esta poupança energética de longo prazo, utilizada a uma alta taxa e a um baixo custo, é o que vem possibilitando a atual civilização industrial e de consumo, com alimentos baratos e abundantes. Um aforismo a ser lembrado é “Agricultura é a ciência de transformar energia fóssil em alimento” (COMITRE, 1993). Em horizonte próximo de um a dois séculos, não teremos nenhuma energia fóssil disponível, barato ou caro. Toda a energia necessária, inclusive para a produção de energia, terá que vir de energia renovável.

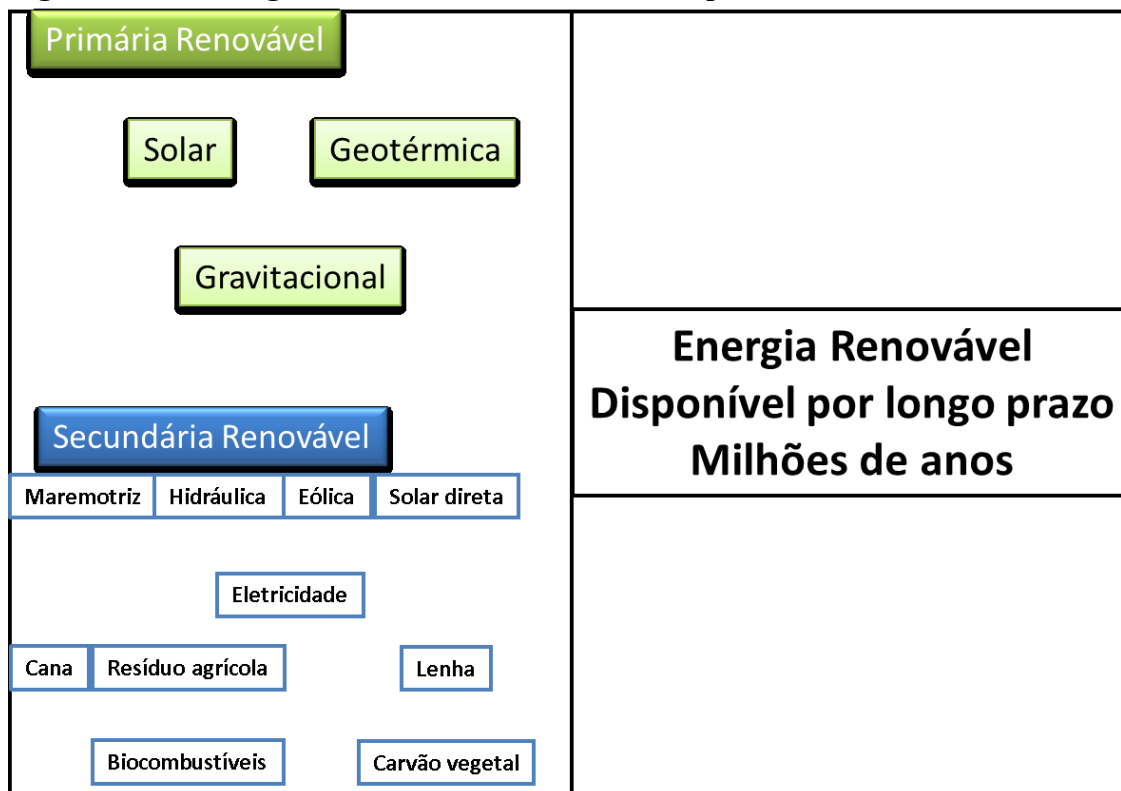
**Figura 2-5** Figura Energia Fóssil: Definição e exemplos



**Fonte:** Elaboração do Autor

A Energia classificada como “renovável” como ilustrado na Figura 2-6, é uma energia secundária que deriva exclusivamente da captura da energia solar. A principal característica é que é produzida na mesma velocidade em que é consumida. A energia secundária produzida é na forma de eletricidade, difícil de armazenar, ou na forma de energia química, com alta densidade de energia e facilidade de armazenamento. Algumas energias renováveis, como biocombustíveis, ainda tem o benefício extra de absorver CO<sub>2</sub>, minimizando aquecimento global.

**Figura 2-6 Energia Renovável: Definição e exemplos**



**Fotne: Elaboração do Autor**

Para fins de contabilização no balanço energético, energia é dividida em Energia Direta e Energia Indireta. Energia direta é aquela energia que é diretamente mensurável, com custo financeiro explícito. Por exemplo, diesel usado como combustível para tratores e a eletricidade usada em motores elétricos para bombeamento de fluidos.

Energia indireta é a energia embutida em cada produto ou serviço, usada para a sua produção, manutenção e movimentação até o consumidor final. É uma energia que foi usada, mas não é visível para o consumidor final, embora seja cobrado como parte do preço do produto ou serviço. De um modo geral, a energia indireta é muito maior que a energia direta, embora não seja contabilizada pela maioria dos estudos sobre balanço energético.

O custo financeiro de um produto ou serviço não é um indicador fiel de energia indireta embutida no produto ou serviço. No Brasil existem muitos subsídios cruzados por determinação governamental, favorecendo alguns setores ou produtos com energia subsidiada. Esta prática não só desestimula práticas de conservação energética como produz falsos quadros de produtividade industrial e social.

## **2.4 Sustentabilidade: conceito “escorregadio”**

Quando se analisa um ciclo produtivo, se deve estabelecer fronteiras que definam o sistema que está sendo analisado. Estas fronteiras definem até onde se buscará os dados primários para os cálculos internos, e até onde se explicitarão os valores de interesse. O cenário proposto nesta dissertação é de término definitivo de toda energia fóssil, e sem alternativas como Fusão Nuclear viável. Portanto, sendo E1G a energia secundária de interesse, a fronteira do sistema vai desde a captura da energia solar, passando pelo uso de terra, produção dos insumos agrícolas e químicos industrializados, transporte desses insumos, aplicação destes na terra, plantio, colheita, produção e manutenção de equipamentos, transporte de biomassa, operações industriais (e seus insumos), transporte de E1G, e distribuição final ao posto de combustível. Esta ampla fronteira força a coleta de dados primários de uma grande variedade de campos especializados, tomando cuidado com a integração dos dados energéticos entre fronteiras. Todo coproduto e energia que sai de um subsistema tem que ser contabilizado ao meio ambiente ou para algum subsistema posterior. Especial cuidado tem que ser tomado para evitar dupla contagem da mesma energia, em casos de uso de coproduto em uma etapa anterior do fluxo produtivo.

Como geralmente a relação entre energia indireta e energia direta é de uma ordem de grandeza (muito mais energia indireta que energia direta) para um produto ou serviço, a limitação de fronteira do Sistema diminui a complexidade da análise, mas também limita a utilidade dos indicadores calculados, ao não explicitar a energia indireta.

## **2.5 O que é realmente sustentabilidade**

A melhor definição para o conceito de sustentabilidade é: “ações e atividades humanas que satisfaçam as necessidades atuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras” (UNITED NATIONS, 1987). Para atingir esta meta, deve-se cumprir os requisitos apresentados no Quadro 1-1.

De um modo geral, é necessário manter a disponibilidade de recursos naturais indispensáveis para produzir e movimentar todos os produtos que consumimos na

sociedade industrial e pós industrial moderna. Por produtos deve-se incluir produtos físicos, serviços, transportes, alimentos, processamento e transmissão de informações. Os insumos necessários são qualidade de ar e água, clima estável, recursos minerais, e claro, muita energia.

Os estudos sobre ecologia, impactos ambientais, e assemelhados, se preocupam muito com impactos ambientais visíveis de curto prazo, como emissão de CO<sub>2</sub>eq, poluição atmosférica, poluição de aquíferos, mas pouquíssimos estudos focam na taxa de consumo de energia fóssil. A definição mais ampla de sustentabilidade tem que incluir todos os insumos necessários para suprir as necessidades atuais e as futuras. Portanto, tem que incluir o suprimento de energia disponível para manter a mesma sociedade atual.

Toda a questão de sustentabilidade real a muito longo prazo, é centrada na questão “quanta energia renovável teremos sem uso de energia fóssil”. Todos os problemas de reciclagem de materiais físicos e impactos climáticos podem ser controlados e até revertidos com uso de energia abundante, desde que renovável. Assim, os indicadores mais importantes a longo prazo, na opinião deste autor, são os indicadores de eficiência da produção energética (EROI), APWeq e intensidade de energia na economia, medida em MJ/R\$, na nossa complexa economia moderna.

## **2.6 Indicadores sustentabilidade**

Um indicador de sustentabilidade é definido como um valor que depende de vários outros, traduzindo um processo complexo em algo aparentemente fácil de entender. Como todo processo de condensar muitos dados, informação se perde, só temos uma tendência média, um número que pode ser ilusório. No caso da produção energética e impactos ambientais, o processo é muito mais complexo, e um indicador único permite manipulações estatísticas e distorções de dados primários que podem provar qualquer tese do grupo interessado. Nesta seção examinam-se apenas 5 indicadores e tenta-se ressaltar as principais armadilhas conceituais e numéricas de cada um deles. Os indicadores são CO<sub>2</sub>eq, NEV, EROI, APWeq, EFP. (GARG, 2006).

CO<sub>2</sub>eq é a quantidade de gases com efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, gases fluorinados) equivalente ao poder de retenção térmica do CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre

(GARG, 2006). A unidade é kg CO<sub>2</sub>eq/unidade de energia produzida. Este é o principal indicador usado por ativistas para defender uma determinada forma de energia considerada renovável. Também é a principal métrica que classifica uma forma de energia como “mais verde” ou “mais sustentável”. Justamente por causa da percepção popular, são sancionados incentivos fiscais, como créditos de carbono e créditos agrícolas, para formas de energia que declaradamente emitam menos CO<sub>2</sub>eq, seja na produção, seja na sua aplicação, independentemente do seu EROI.

NEV<sup>1</sup> é a razão entre a energia líquida conseguida depois de toda a energia usada para o ciclo total da cadeia produtiva (exploração, extração, transporte, refino, distribuição), pela energia total extraída. Usada nos casos de uso de energias fósseis, onde a própria energia sendo extraída é usada para manter a cadeia produtiva. Neste contexto, é uma medida de eficiência de processos. O número varia de 0 (zero) a 1 (um). Quanto maior, melhor. Normalmente, com combustíveis fósseis, ao longo do tempo, NEV vai se distanciando de valores iniciais altos (como 0,99 para os primeiros poços de petróleo no fim do século 19) e ficando cada vez menor, ao redor de 0,40 a 0,50 para os poços marinhos ultra profundos. (HALL, 2011)

EROI<sup>2</sup> é a energia bruta produzida pela energia total necessária para toda a cadeia produtiva, desde a fonte primária de energia até o uso pelo consumidor final. Note que a contabilização da energia não inclui só energia fóssil. Usado principalmente no caso de energia renovável. Os valores teóricos podem variar de 0 (zero) até ∞ (infinito). Aplicado a fontes de energia considerados renováveis, quanto maior o número, mais renovável é a energia, pois precisa usar menos energia total para a sua produção. EROI menor ou igual a 1,0 é uma energia que não é renovável, já que produz menos energia que a energia investida na sua produção.

APWeq<sup>3</sup> indica a taxa de aproveitamento de energia proveniente do sol (em W/m<sup>2</sup> equivalente) incidindo sobre uma superfície terrestre. Como quase todas as formas de energias renováveis usam alguma área de superfície para sua coleta de

---

<sup>1</sup> NEV Net Energy Value tem valor entre 0,0 a 1,0 pois mede a energia líquida disponível quando usado a energia bruta da própria energia sendo extraída. Usada para medir eficiência de extração e uso de energia fóssil

<sup>2</sup> EROI Energy Return Over Invested tem valor entre 0,0 a infinito, pois mede a energia total produzida depois de investir energia para a sua produção. Pode ser maior que 1,0 pois neste balanço está incluída energia solar capturada direta ou indiretamente. Usada para medir a sustentabilidade da produção de energia renovável

<sup>3</sup> APWeq Areal Power Watt Equivalent é uma medida da eficiência de coleta de energia solar por uma fonte de energia renovável. Varia de 0,0 a 170W/m<sup>2</sup> (radiação solar máxima no Equador no solstício). Quanto maior, melhor o aproveitamento da área de terra usada

energia primária, quanto maior o índice, menos terreno teremos que alocar para a produção desta energia renovável.

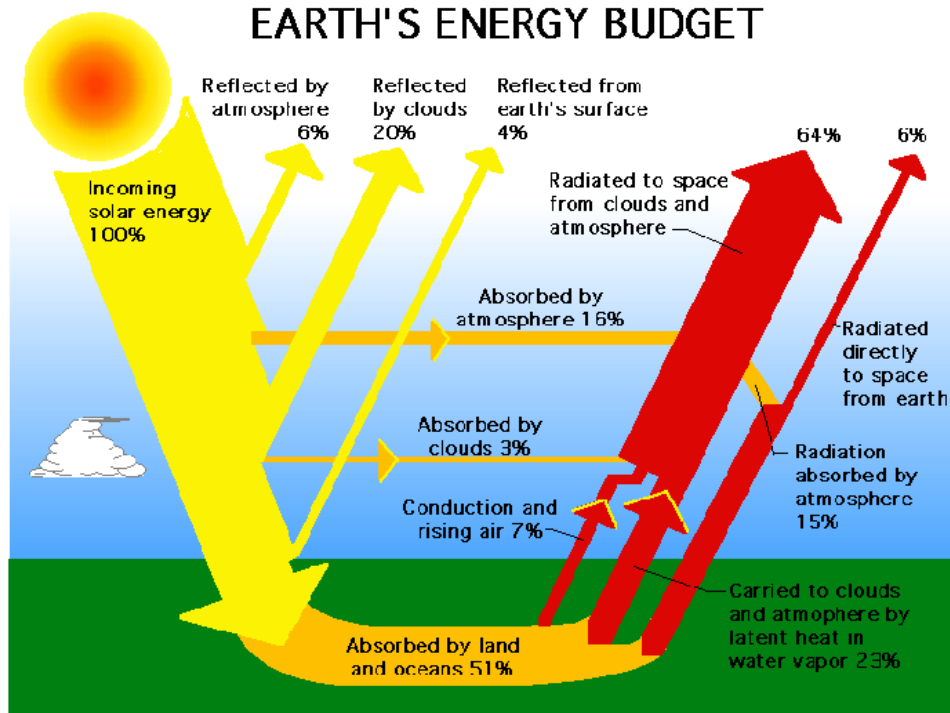
EFP (Energy Foot Print), CFP (Carbon Foot Print) e WFP (Water Foot Print) estão proximamente relacionadas e são intensidades de um recurso finito por unidade de produto ou serviço analisado. EFP é medido em unidades de Energia por unidades de produto, como MJ/kg ou MJ/litro ou MJ/m<sup>3</sup> de produto final. CFP é medido em unidades de CO<sub>2</sub>eq por unidade de produto, como CO<sub>2</sub>eq/kg ou CO<sub>2</sub>eq/litro. WFP é medido em volume de água por unidade de produto, como Litro/kg ou Litro/litro.

## 2.7 Origem de tudo: o SOL

Exceto energia de fissão nuclear, geotérmica, e energia maremotriz (gravitacional lunar), todo o resto da energia que usamos hoje e no futuro previsível (séculos) é proveniente da energia solar. A última estimativa da taxa média de energia solar incidente na Terra, coletada por anos por meio de um satélite especial para esta função, é de 1.361 W/m<sup>2</sup> (KOPP, 2011) para a seção transversal da Terra, em ângulo reto ao eixo Sol-Terra, sem atmosfera nem cobertura de nuvens. A latitude influencia na radiação captável. Parte é refletida direto pelas nuvens e atmosfera. Cobertura de nuvens muda o albedo. Chuvas diminuem a radiação restante.

A primeira redução é a relação entre seção transversal e superfície da Terra. Esta relação é de 4 para 1, assim a radiação média já cai para um quarto, para o valor de 340W/m<sup>2</sup>. A perda atmosférica varia um pouco conforme autor e época de mensuração, além de metodologia de mensuração (estações terrestres e estudos radiométricos de satélites) e metodologia estatística. Mas todos os resultados se situam entre 0,49 a 0,51 da radiação total possível. Nesta dissertação é adotado o valor médio de 0,50, resultando aproximadamente em 170 W/m<sup>2</sup> de potência de radiação solar na superfície terrestre. A potência real disponível diminui conforme o coseno da latitude (Real = Média × cos(latitude)). Acresce a isso o efeito do caminho ótico mais longo pela atmosfera até a superfície quando se aumenta a latitude, e a cobertura de nuvens variável, a energia solar direta disponível é bem menor, conforme ilustrado na Figura 2-7.

Figura 2-7 Balanço energia solar na Terra.  
**EARTH'S ENERGY BUDGET**



Fonte: TRENBERTH (1997)

Ainda assim, a energia solar total disponível é assombrosa. Mesmo levando em conta todos fatores de atenuação, na latitude da cidade de São Paulo, latitude 23 graus, incide uma potência solar média de  $156,6 \text{ W/m}^2$  ( $170 \text{ W/m}^2 \times 0,92$  onde 0,92 é coseno de 23,5 graus). Usando um ano médio de 365,25 dias em um ciclo de 6 anos, resulta em um acúmulo de  $296,7 \times 10^6 \text{ MJ/ha/ciclo}$  de cana na latitude 23 sul, sem cobertura de nuvens e chuvas. Como temos 5 safras no ciclo de 6 anos, temos um valor de  $59,33 \times 10^6 \text{ MJ/ha/colheita}$  na latitude 23 sul. Usando o valor de 22,054 MJ/litro de etanol anidro com menos de 0,5% de água, e adotando um uma produtividade média de 5.900 litros de etanol por hectare (CONAB, 2016a), temos uma energia útil extraída de 650,581 MJ/ha/colheita. Destes números, calcula-se que a relação entre energia solar disponível (sem cobertura de nuvens nem chuvas) e energia de etanol líquido produzido é de 456 vezes. Ou apenas  $0,327 \text{ W/m}^2/\text{colheita}$ . Estes dados devem ser considerados na avaliação da melhor forma de aproveitamento de terra disponível e energia solar disponível, comparando com os indicadores para energia fotovoltaica, CSP<sup>1</sup> e eólica.

<sup>1</sup> CSP Concentrated Solar Power, energia solar usando calor da radiação solar, concentrada para gerar vapor superaquecido para geração convencional por meio de turbinas



Creditando energia elétrica excedente e uso de metade do palhiço do campo, esta relação entre energia solar e energia de biocombustível melhora, mas não de maneira significativa.

## **2.8 Cana-de-açúcar: energia quase primária**

Qualquer biomassa que não seja nativa (disponível exclusivamente por métodos extrativistas sem uso de insumos agrícolas) é considerada energia secundária. Na agricultura industrial, o solo e clima são considerados “equipamentos de fábrica” com energia solar e muitos insumos agrícolas como matéria-prima, combinados com tecnologia, mensurações rigorosas e correções das condições ambientais, como se fossem processos industriais. Os milhões de anos necessários para a acumulação da energia solar na forma de energia fóssil, é substituído por uma prática semelhante a uma produção industrial onde são usados energia secundária para a produção acelerada de energia química na biomassa. Produção de alimentos para uso humano ou animal segue o mesmo princípio. Usando dados da FAO e outros órgãos que monitoram agricultura e pecuária, USDA<sup>1</sup> estima que precisa de um mínimo de 17 Mcal para entregar 2 Mcal de energia em comida para um humano (FAO, 2011).

A importação e movimentação de quase todos os nutrientes agrícolas, de fornecedores situados a longa distância (Canadá, Rússia, Oriente Médio), além do transporte interno dos portos marítimos até as fazendas (centenas de quilômetros) incorre em muita energia indireta. A energia necessária para importação de insumos não foi incluída no balanço energético, é aceito que sem energia fóssil, não existe energia excedente para importação de adubos e insumos agrícolas, só é disponível a produção local de insumos agrícolas em cada país.

---

<sup>1</sup> USDA United States Department of Agriculture, ministério que tem entre outras atribuições, supervisão sobre produção de alimentos e seus efeitos sobre a saúde humana e sobre a alimentação diária

## 2.9 Caracterização da cana

Cana-de-açúcar é uma planta cuja classificação científica é Reino: *Plantae*, Divisão: *Magnoliophyta*, Classe: *Liliopsida*, Ordem: *Poales*, Família: *Poaceae*, Gênero: *Saccharum*. Tem muitas espécies no Brasil, entre elas a *S. Spontaneum* e a *S. Robustum*. Embora não seja nativa do Brasil, adaptou-se bem ao solo e clima, com boa produtividade de biomassa e sacarose (ANDRIETTA 2009; VIOLANTE, 2012; GALO, 2013). É uma planta gramínea, semi-perene, que precisa de solo argiloso e siltoso para boa produtividade, com atividade fotosintética C4<sup>1</sup>, que precisa de pelo menos 1.500 mm de chuva por ano, e estações bem definidas, com estresse frio para acúmulo de sacarose.

Pesquisa agrônômica em geral e Embrapa em particular, tem desenvolvido subespécies híbridas que se adaptam a regimes hídricos e solos específicos, maximizando produtividade local da cana. A cana é plantada a partir de mudas, onde a primeira colheita é de alta produtividade de biomassa. Esta cana é chamada de cana planta. Após o corte rente ao solo, a planta continua a crescer, para novo ciclo de colheita no próximo ano. A estas plantas é chamada de cana soca (segundo corte) e cana resoca (terceiro corte em diante). A produtividade vai decrescendo a cada colheita, até chegar a um ponto em que vale a pena investir na limpeza total do terreno, preparação, e novo plantio, recomeçando o ciclo produtivo (MACEDO, 2004).

A planta é composta de massa radicular, colmos e pontas e folhas. A energia total é distribuída em partes aproximadamente iguais na massa radicular, nos colmos, e nas folhas (secas e verdes) e pontas. O colmo contém aproximadamente 70% de água, sendo o remanescente dividido aproximadamente em meio a meio de bagaço seco e sacarose, além de 1% a 2% de proteínas e outros produtos orgânicos, e minerais (COSTA, 2012; ALBERTON, 2012; OLIVEIRA, 2012a). O que é transportado para a usina são os colmos, para extração do caldo (água e sacarose, principalmente) e para uso do bagaço como fonte energética para processos industriais. De um modo geral, temos excedente energético da queima do bagaço, sob a forma de eletricidade gerada em cogeração (vapor de processo e eletricidade).

---

<sup>1</sup> Fotosíntese C4 é a rota bioquímica de fixação de carbono a partir de CO<sub>2</sub> atmosférico e água. Também é conhecido como Rota Hatch-Slack, em homenagem aos dois pesquisadores que detalharam a rota bioquímica em 1966. A denominação C4 é devido ao fato de um dos primeiros produtos intermediários é um composto de 4 carbonos, um oxaloacetato. Usa mais ATP (30) contra fotossíntese C3 (18 ATP) mas é compensado por não perder muito carbono durante a fotorespiração.

## **2.10 Histórico etanol automotivo no Brasil**

Brasil tem uma relação histórica com a cana-de-açúcar, desde o século 16. Açúcar era uma fonte de riqueza para países europeus exploradores. Europa demandava açúcar, com concorrentes na França e no Caribe. A primeira região usada para a implantação da cana foi o nordeste. Naquela época, não era produzido açúcar, mas a rapadura, feita a partir de caldo de cana, sendo aquecido até concentrar bem o caldo, sendo vertido em fôrmas de madeira de formato cônica. O melaço vazava para baixo, o que sobrava era rapadura bruta, sólida, que podia ser armazenado por muito tempo.

Até meados do século 19, cana só produzia açúcar no Brasil, exportando para Portugal, que revendia para o resto da Europa. Em 1887 Dom Pedro II criou o Instituto Agrônômico para pesquisas sobre a cana (CORTEZ, 2016), cultivando variedades diferentes que se adaptaram melhor ao clima brasileiro. Na mesma época, na França já se praticava a destilação fracionada do álcool de cana. em 1903 começou o movimento para substituir querosene importado por álcool brasileiro (CORTEZ, 2016). Em junho de 1927, a Usina Serra Grande Alagoas lança o produto álcool -motor, com capacidade de substituir a gasolina em carros importados. Em 1933 o presidente Getúlio Vargas criou a primeira estatal brasileira do álcool, o IAA, que arbitrava a fração da produção em açúcar e em álcool. Em 1942, o Decreto 4722 garantia um preço mínimo para o álcool.

Presidente Getúlio Vargas criou a Petrobras em 1953, como um monopólio estatal. Dez anos depois, em 1963, é criada a STAB com objetivos de avanço científico sobre a cultura da cana. em 1969 foi fundada a CTC com o objetivo de desenvolvimento tecnológico industrial da cana. (CORTEZ, 2016).

Em 1973 houve o primeiro choque do petróleo, quando o Brasil importava cerca de 80% do seu petróleo. Forçado pelo estrangulamento energético, empresários e governantes se uniram para encontrar uma alternativa ao petróleo, e em 1975, o presidente Ernesto Geisel, por meio do Decreto 76593, cria o programa ProAlcool, defendido por um elenco de expoentes técnicos e empresariais (CORTEZ, 2016), com incentivos fiscais e definição de paridade de preços entre etanol e açúcar e gasolina. Pouco antes disso, ITA/CTA já tinha desenvolvimento de uso de etanol hidratado como

combustível para motores de desenvolvimento brasileiro (CORTEZ, 2016), ajudando a viabilizar o ProAlcool.

No final da década de 1970, Unicamp começa as pesquisas sobre hidrólise ácida de celulose, além das pesquisas da Coalbra com tecnologia soviética (CORTEZ, 2016). Na mesma época, ocorre o segundo choque do petróleo com a guerra Iran-Iraque. Esta nova motivação inicia a segunda fase do uso de etanol em motores brasileiros, e também viabiliza uso de petróleo de bacias marinhas, como em Campos/RJ (CORTEZ, 2016), motivados agora pelo desejo de autosuficiência de petróleo e energia. Nesta segunda fase, houve forte financiamento tanto do governo federal como do Banco Mundial, viabilizando fornecedores nacionais como Dedini e Zanini, e para ampliação de área cultivada e novas usinas (CORTEZ, 2016). Esta segunda fase termina com o fim oficial do ProAlcool em meados da década de 1980.

A terceira fase durou de 1985 (fim do ProAlcool) até 2003, onde houve estagnação de consumo de etanol, falta de fornecimento para os carros existentes, importação de metanol para complementar a produção brasileira de etanol, preços elevados para etanol combustível, extinção do IAA (1992), e retração e descrédito geral do uso de etanol automotivo (CORTEZ, 2016). A produção de veículos leves com motores adaptados para etanol hidratado, praticamente parou.

A quarta fase começou em 2003 até os dias atuais, quando foi introduzido o primeiro motor bicombustível no Brasil, podendo usar mistura em qualquer proporção de gasolina e etanol. Este lançamento foi feito com amplo esforço de divulgação do governo federal, IPT, Unica, e uma montadora pioneira, conseguiram criar uma demanda pelo público consumidor (CORTEZ, 2016). Desde então os carros leves bicombustíveis dominaram o mercado consumidor, sendo a demanda de etanol regido pelos preços relativos entre os combustíveis e pelos rendimentos de cada motor específico.

Durante estas fases, aumentou muito a produtividade agrícola (dobrando a produtividade em tonelagem por hectare e ATR por hectare). Simultaneamente, houve melhorias significativas da produtividade industrial, com mais eficiência de extração do caldo e fermentação, além de melhoras de processo que demandam menos energia de vapor por tonelada de cana processada. Além disso, houve pesquisas sobre aproveitamento de subprodutos como vinhaça e torta de filtro, aproveitados como fontes de nutrientes e biogás para energia.

Este aumento de produtividade não veio sem efeitos colaterais. Com limitação de expansão de terras agriculturáveis, principalmente nos países desenvolvidos, a saída foi o incremento artificial da produtividade vegetal (PFEIFFER, 2004) para uma mesma área de terra. Nascia a chamada Revolução Verde, ao redor de 1950 (PFEIFFER, 2004), que equivale à Revolução Industrial aplicado à agricultura. Foram aplicadas as técnicas industriais de produção em massa de produtos padronizados, com monoculturas, uso intensivo de adubos e condicionantes de solo, e mecanização. Esta metodologia produtiva implica em uso intensivo de energia, seja diretamente na mecanização, seja indiretamente na produção e manutenção da infraestrutura industrial, seja de maneira mais indireta ainda, na forma de adubos, insumos agrícolas, e movimentação de produtos e insumos a longa distância. Estudos indicam que a relação entre energia usada para a produção de alimentos, e a energia útil disponível, chega a 70%, equivalente a um EROI de 1,40 (PFEIFFER, 2004). Estes valores são compatíveis com os indicadores para E1G, apesar de haver diferenças de aproveitamento de biomassa residual. Este valor de EROI só se relaciona com a Fase Agrícola, e não é contraditório em relação à relação de 17 para 2 relatado por organismos internacionais como FAO (2011), pois estes estudos incluem a cadeia completa do alimento, desde insumos, produção, atacadista, distribuição, comercialização, e preservação pelo consumidor final, além de industrialização de alimentos processados.

Em 2003 surgiu no Brasil o primeiro veículo leve FFV<sup>1</sup> ou bicomustível, podendo usar gasolina C ou E1G em qualquer proporção (CORTEZ, 2016). A contrapartida é que esta decisão estratégica, se por um lado voltou a viabilizar o uso de E1G e retirou a responsabilidade do estoque de E1G pelo governo federal ou pelos usineiros, por outro lado diminuiu o rendimento (SOUZA, 2015; PFEIFFER, 2004) do consumo de combustíveis não fóssil. Motores otimizados para E1G, mesmo usando carburadores, tinham um consumo em km/L, de 85% do consumo de motores otimizados para gasolina C. Com motores flex, o consumo é de 70% do consumo do mesmo motor flex usando gasolina C.

Em 2008 EPA americano concedeu o “status” de “*advanced* biofuel” para E1G brasileiro (CORTEZ, 2016) pois, segundo dados brasileiros, consegue reduzir em 61% as emissões de CO<sub>2</sub>eq em relação à gasolina pura. (CORTEZ, 2016) Para chegar a este índice, a produção do etanol e seu uso não pode emitir mais que 50% do CO<sub>2</sub>eq

---

<sup>1</sup> FFV Flex Fuel Vehicles ou veículos usando mais de um combustível, como gasolina e gás natural, gasolina e etanol

comparado com gasolina pura. Portanto, EROI final tem que ser maior que 2,50 (0,4 usado, 1,0 produzido) incluindo o transporte internacional de insumos e produto acabado. A razão para esta relação é que o uso de combustível fóssil como fonte de energia para a produção e movimentação do biocombustível, está gerando CO<sub>2</sub> proporcionalmente ao uso da energia fóssil demandada. A emissão de CO<sub>2</sub>eq foi estimado pelo Instituto AgroIcône, juntamente com a Universidade de Iowa, o modelo matemático BLUM (Brazilian Land Use Model), modelo desenvolvido por equipe liderado por André M. Nassar do Instituto AgroIcône, com patrocínio da UNICA, (CORTEZ, 2016). Cortez (2016) não explicita nem o relatório demonstrativo do governo brasileiro, nem os dados que permitam chegar a esta emissão de CO<sub>2</sub>eq.

Em 2013 Petrobras começou operação de uso de alcoolduto entre Ribeirão Preto e Paulínia (CORTEZ, 2016).

Uma projeção das eficiências e vantagens ambientais do E1G brasileiro são relatados por CORTEZ (2016), que declara o uso de 320kg/vapor por tonelada de cana para geração de E1G hidratado, embora sem especificação de condição PT<sup>1</sup> de extração do vapor. Outros indicadores são 89% de eficiência da caldeira, rendimento de 87<sup>2</sup> litros de E1G por tonelada de cana processada, 78%<sup>3</sup> (setenta e oito por cento) de bagaço excedente, com produção de energia elétrica excedente de 50MW com taxa de 12.000 TCD (toneladas de cana processada por dia) (CORTEZ, 2016). Estes fatores afetam muito EROI final de E1G hidratado.

## 2.11 Incertezas e Erros na Literatura

Uma característica notada na revisão da literatura sobre o tema, é a grande variação numérica dos dados e resultados relatados para o mesmo parâmetro ou sobre resultados. Não que cada autor relate alta incerteza nos seus resultados, mas autores diferentes que estudam um mesmo tema relatam resultados muito diferentes, mesmo com metodologias semelhantes. Como a maioria se especializa em estudar uma fração da cadeia produtiva inteira, simplesmente usam os dados relatados por outros autores

---

<sup>1</sup> PT Pressão e Temperatura para caracterização do estado do vapor e portanto a sua energia interna

<sup>2</sup> Este valor de 87 (usado nos estudos do Macedo (2004) que gerou um EROI de 9,3 como ponto de partida) está muito acima dos valores recentes relatados por CONAB (2016a).

<sup>3</sup> Possivelmente erro de impressão e o valor correto seja 7,8% de excedente de bagaço. No entanto, este valor de bagaço excedente foi usado no balanço energético.

que estudam trechos complementares da cadeia produtiva. Sem verificação dos dados, verificação de consistências, dados conflitantes de referências diferentes, relacionamento dos dados ao contexto, etc. Ao se basear em dados não verificados, chegam a conclusões nem sempre corretas.

O Ciclo Produtivo pode ser dividido em Fases: Agrícola, Industrial, e Distribuição, conforme detalhado na Seção 3-6. Para cada Fase são necessários Dados Primários de produtividade, consumo energético, consumo quantitativo, dados de manutenção. Com estes dados, podemos calcular os Dados Secundários para cada atividade de cada Fase, calculando um “Vetor Energia<sup>1</sup>” para cada Atividade.

A pesquisa bibliográfica foi feita orientado para levantamento de dados específicos para cada Fase usada em Materiais e Métodos.

Na fase Agrícola são necessários os dados Primários: produtividade da cana, consumo de insumos agrícolas, uso de máquinas agrícolas e recursos humanos, distâncias percorridas.

Na fase Industrial são necessários os dados Primários: produtividade industrial de E1G (sem melaço de açúcar), consumo de energia de processo, consumo de energia mecânica, consumo de insumos industriais.

Na fase Distribuição são necessários os dados Primários: capacidade de veículos, consumo de diesel da frota, distâncias percorridas.

A produtividade da cana, medida em toneladas de colmos por hectare, varia bastante conforme a referência. MACEDO (2004) relata produtividades de 90 a 100 ton/ha, usando dados de fazendas do Estado de São Paulo, relatados por entidade de classe, sem verificação no campo. Segundo CONAB (2016a) a produtividade média brasileira é de 71 ton/ha em 2016. A produtividade do campo influencia diretamente e proporcionalmente EROI final No cenário de longo prazo sem energia fóssil, o correto é usar a média brasileira, não uma produtividade regional.

A produtividade industrial de E1G, em litros/ton cana, também varia conforme a referência. Muitos autores usam os dados líquidos fornecidos pela usina anexa, que inclui implicitamente entre 12 a 15 litros por tonelada de cana, chegando a um pico de 23 litros/ton cana, ao processar o melaço resultando da produção do açúcar na usina anexa. (NOGUEIRA, 2008; MUTTON, 2012; MACHADO, 2012).

---

<sup>1</sup> Vetor Energia é um vetor com 9 componentes com diferentes usos de energia para cada atividade. Detalhamento do vetor e seus componentes estão no Quadro 3-1. Esta padronização sistemático em vetor energia permite análises de energia por atividade e por tipo de uso independentemente da atividade ou fase.

Algumas referências usam a produtividade bruta em litros/hectare, com valores informados por associações de classe, variando de 8.100 litros/ha (ANDREOLI, 2014) a 4.336 litros/ha (MACEDO, 1992), passando por valores como 7.000 litros/ha (TONON FILHO, 2013) a 7.199,5L/ha (SALLA, 2009).

A fronteira do sistema sendo analisado varia muito, gerando indicadores muito diferentes para a mesma cadeia produtiva. Como exemplo, a energia indireta de açós varia de 20MJ/kg (SOUZA, 2010) até mais de 60MJ/kg (MACEDO, 2004), até 80MJ/kg para metais específicos para motores e caixa de câmbio (BOUSTANI, 2010).

Muitos autores usam dados temporalmente defasados, como rendimento de biomassa em um ano antigo como média para anos recentes, ou dados de outros países sem a devida correção de contexto.

A grande maioria dos estudos é especializado em um setor da cadeia produtiva, como exploração, extração, beneficiamento ou refino. Um autor especializado em produção industrial não necessariamente entende o que é um Fator F, ou que a energia de nitrogenados depende da formulação do nitrogenado, e com isso usar dados de energia numericamente errados. Ou simplesmente não verifica a consistência dos dados referenciados dentro do mesmo estudo, mas de fontes diferentes.

Por exemplo ZUURBIER (2008) na página 123 referencia valores de consumo de NPK mas não informa se é por safra, se é por ano calendário, nem se os dados são do mesmo ano. Uma produtividade de 8.100 litros de etanol por hectare está muito acima das médias brasileiras (aproximadamente 5.900 litros por hectare (CONAB, 2016a)). Enquanto isso, 25kg de nitrogênio elemental é muito baixo para as necessidades médias relatadas pela maioria dos estudos brasileiros (VITTI, 2005; VITTI 2009; VITTI 2010).

Outro exemplo, MACEDO (2007) relata dados conforme a Tabela 2-2, adaptada da Tabela 6 da referência, onde fica evidente que a energia devido ao transporte dos insumos por centenas de quilômetros até a fazenda, não foi levando em consideração (SOARES, 2009; SILVA, 2013; GARCIA, 2011),



**Tabela 2-2 Tabela correlação entre Demanda Energia e Emissão CO2eq**

	Demanda Energia <sup>1</sup>	Fator Emissão <sup>2</sup>	MJ/GHG <sup>3</sup>
	MJ/kg	kg C/kg	MJ/C
Nitrogênio	56,3	3,97	14,18
Fosforo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,5	1,30	5,77
Potássio K <sub>2</sub> O	7,0	0,71	9,86
Calcário	0,1	0,01	10,00

**Fonte: MACEDO (2007) com adaptações pelo autor**

Como está implícito que foi usada energia fóssil para a produção dos insumos agrícolas, e a mesma referência cita na tabela 4 os valores de emissão de C (carbono) por MJ por tipo de energia fóssil usada, variando os valores entre 22,3g/MJ até 27,5g/MJ, as variações de 5,77 até 14,18 na coluna calculada por este autor não se justifica pela variação de uso de energia fóssil. Esta inconsistência é levada até o fim, resultando em um indicador de emissão de CO<sub>2</sub>eq incorreto. Embora este caso em particular não influa no cálculo de EROI, os seus dados, usados por outros autores como dados primários sem verificação de consistência, ajuda a propagar erros de indicadores pela literatura pesquisada.

Limitação de fronteira reduz muito a energia indireta de insumos agrícolas como adubos e corretivos de solo, pois não contabiliza energia indireta que já está embutida nos preços dos insumos, mas não é refletida nos balanços de energia.

Muitas estimativas de intensidade de energia são feitas usando a intensidade média de energia por setor ou pela economia inteira. Para ambiente americano recente, é aceito o valor de 8,4MJ/\$ de PIB americano, enquanto que no setor de energia fóssil o valor aceito é de 20MJ/\$ (HALL, 2011).

Esta metodologia pode ser usado para estimar a energia indireta em um equipamento de infraestrutura, como uma sonda ou torre de perfuração marítima. Uma plataforma com custo de 1 bilhão de dólares, em princípio teria uma energia indireta média de 20 bilhões de MJ. Com uma massa aproximada de 50.000 toneladas, temos uma intensidade de energia de 400MJ/kg de metal estrutural da plataforma, muito acima dos valores médios de 20MJ/kg a 80MJ/kg usados pela maioria dos autores Na indústria

<sup>1</sup> Energia demandada por kg de insumo. Não se entende por que o valor para Calcário está tão abaixo dos fosfatos e potássio, uma vez que os três são minerados e transportados por longas distâncias até a fazenda

<sup>2</sup> Autor da referência bibliográfica não explica se este C é carbono puro, ou se é CO<sub>2</sub>eq

<sup>3</sup> Relação calculado pelo autor desta dissertação, dividindo o valor da Demanda de Energia pelo valor da coluna Fator Emissão

pesada a energia de conformação do metal às vezes supera a energia indireta da produção do metal (BOUSTANI, 2010; SULLIVAN, 2010; ZVI, 2015).

Pelas incertezas explicitadas acima, neste trabalho só foram coletados dados primários da literatura, documentados no Apêndice A1, após verificação de consistência do valor adotado. Todos os dados secundários são recalculados, com metodologia explícita e documentada no Apêndice A2. Se um determinado dado primário tem valores relatados por autores diversos, em uma faixa muito grande de valores, um esforço é feito para ampliar a fronteira na cadeia produtiva do insumo ou atividade sob análise, conforme documentado no Apêndice A1. Por exemplo, foi necessário ampliar a fronteira no levantamento de energia indireta do aço e energia indireta dos compostos nitrogenados, energia indireta de movimentações de produtos e insumos.

Cada dado primário foi registrado com valor máximo e mínimo com referências bibliográficas, quando disponíveis. O valor adotado foi registrado com justificativa. Desta maneira, Apêndice A1 forma uma base de dados confiável para uso posterior por outros autores.

O excedente de energia na Fase Industrial relatada na literatura varia de 5% (diversos autores) a 6,7% (MACEDO, 2004) a 78% (CORTEZ, 2016) da energia bruta total gerada pela queima do bagaço de cana, enquanto outros relatam o excedente energético em kWh de eletricidade líquida, já descontadas as perdas de cogeração. Alguns autores relatam o excedente em energia diretamente pelo PCI<sup>1</sup> do bagaço, deixando de lado todas as perdas de processos de conversão do bagaço em vapor, do vapor em energia mecânica da turbina, da turbina até o gerador, e com isso gerando resultados excessivamente otimistas.

## **2.12 Resultados e conclusões da literatura**

O principal indicador pesquisado, EROI de E1G, é facilmente encontrado na literatura acadêmica sobre o tema, tanto de autores brasileiros como de autores estrangeiros. Os valores usuais encontrados variam de 3,15 a 9,4. A Tabela 2-3 a seguir resume os valores de EROI encontrados na literatura. Com metodologias díspares entre

---

<sup>1</sup> PCI Poder Calorífico Inferior, a energia conseguida com a combustão de um material, sem que os gases produzidos sejam resfriados a uma temperatura de condensação do vapor de água produzido. A contrapartida é PCS Poder Calorífico Superior, a energia conseguida com a combustão de um material, incluindo a energia extra resultante da condensação do vapor de água para temperatura ambiente

os diversos autores, é necessário calcular alguns dados a partir de dados indiretos encontrados dentro da referência bibliográfica. Os valores em branco são valores em que foi impossível relatar ou calcular um dado confiável usando exclusivamente os dados do autor. Note que nem sempre os piores índices de EROI correspondem às menores produtividades de etanol, o que evidencia o peso de outros critérios de alocação de energia direta e indireta. Nesta dissertação, a necessidade de energia na Fase Agrícola chega a 70GJ/ha, enquanto a produtividade total de E1G fica em aproximadamente 5.900 litros/ha. A ampliação da fronteira do sistema, a inclusão de energia indireta de maneira sistemática explicam esta alta demanda de energia na Fase Agrícola. Os detalhes estão descritos na seção 4 (Resultados), seção 5 (Considerações) e nos Apêndices.

**Tabela 2-3 Resultados relatados na literatura**

Referência	EROI	EnergLiq <sup>1</sup> L/ha	Agric <sup>2</sup> GJ/ha	Ind <sup>3</sup> GJ/ha	Distrib <sup>4</sup> GJ/ha	EEE <sup>5</sup> GJ/ha
OLIVEIRA, 2014a	3,15	6.400	35,98	3,63	2,82	1,54
ANDREOLI, 2014	3,24	8.100	44,03	7,49 <sup>6</sup>		
OLIVEIRA, 2005	3,36	5.520	35,98	3,63	2,82	0,56
WALTER, 2008	3,70	6.480 <sup>7</sup>				2,51
WANG, 2012	4,32					
SOUZA, 2010	5,25	7.555 <sup>8</sup>	29,82	0,7134		5,16
MACEDO, 2004	8,3	7.086 <sup>9</sup>	16,65	4,074		
MACEDO, 2009	9,4	7.517 <sup>10</sup>	18,38	2,09		
MACEDO, 1992	6,5 <sup>11</sup>	4.336 <sup>12</sup>	11,45 <sup>13</sup>	3,62 <sup>14</sup>		

**Fonte: Elaboração do Autor**

<sup>1</sup> Energia líquida medida em litros de E1G por hectare colhida incluindo eventual saldo de etanol produzido a partir de melaço de açúcar em usina anexa

<sup>2</sup> Demanda de energia líquida na Fase Agrícola

<sup>3</sup> Demanda de energia da Fase Industrial devido ao uso de químicos e outros insumos

<sup>4</sup> Somente um autor inclui a energia de distribuição no balanço de energia

<sup>5</sup> EEE = Energia Elétrica Excedente

<sup>6</sup> Inclui energia distribuição, autor não separou os valores

<sup>7</sup> Assumindo 80ton/ha produtividade agrícola, dado 81L/ton produtividade industrial

<sup>8</sup> Calculado dos dados 88,89ton/ha de cana produzindo 85L/ton cana

<sup>9</sup> Calculado dos dados 82,4ton/ha de cana produzindo 86L/ton cana

<sup>10</sup> Calculado dos dados 87,1ton/ha de cana produzindo 86,3L/ton cana

<sup>11</sup> Usando entradas energia 221,75MJ/ton cana fase agrícola 70,10MJ/ton cana fase industrial, saídas 1707,11MJ/ton cana de etanol, 175,14MJ/ton cana eletricidade excedente

<sup>12</sup> Baseado na produtividade de 81,3L/ton cana produzindo 1707,11MJ/ton cana com 21MJ/L etanol

<sup>13</sup> Baseado na produtividade 51,63ton/ha e dado 221,75MJ/ton cana

<sup>14</sup> Baseado na produtividade 51,63ton/ha e dado 70,10MJ/ton cana

Vários autores acima incluem o uso de torta de filtro e de vinhaça como complementos de adubação. As condições de aplicação e correlação com os adubos e insumos industriais, nem sempre são claramente declarados. Nesta dissertação, não foi creditada a energia disponível nestes coprodutos por falta de padronização de procedimentos e referências confiáveis.

Os critérios de alocação, fronteiras do sistema, energias contabilizadas, variam de uma referência para outra. Por isso não é correto usar o indicador EROI como índice comparador entre autores diferentes sem um detalhamento das condições usadas no seu cálculo. Além disso, nem todos os autores incluíram a eletricidade excedente no balanço de energia.

### **2.13 Nitrogenados: atenção especial**

Insumos nitrogenados, indispensáveis para o metabolismo da cana, e usado em grande quantidade física, e pela grande influência no valor do EROI final, merece um estudo mais detalhado e uma revisão cuidadosa da literatura. Por demandar muita energia indireta para a sua produção e movimentação, um valor mais confiável é base fundamental para o EROI final do E1G.

Ao contrário dos outros macronutrientes do grupo NPK, a especificação de N para as necessidades nutricionais não é dada em um composto estável, padronizado. É dada em necessidade de massa de N (nitrogênio) puro. Existem várias formulações de compostos de nitrogênio, com variadas relações entre massa molecular e massa de N agregado. Por outro lado, as especificações de P e K são sempre em massa de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . Fica a cargo do agricultor a decisão de qual composto nitrogenado aplicar. Cada um tem características diferentes de custo, disponibilidade (fator F), e complementação no condicionamento do solo, interage de maneira diferente com outros insumos, pluviometria e com a composição química do solo. Por isso, para uma dada necessidade especificada de massa de N por hectare, podemos ter massas diferentes de nitrogenados transportados e aplicados, variando a energia indireta total do insumo.

Infelizmente, pouco N é retido nos coprodutos da indústria sucroenergética. Pouco sobra na vinhaça e na torta de filtro. As cinzas do forno de cogeração tem muito pouco nitrogênio, quase todo foi volatilizado como óxidos de nitrogênio. Assim, novas

técnicas de reciclagem dos macronutrientes, recuperam boa parte do P e do K, inclusive das cinzas, mas pouco pode ser recuperado do N usado.

Um outro fator preocupante é que a produção de nitrogenados usa bastante H (hidrogênio), que é retirado da reforma com vapor de água, a partir de fontes de energia fóssil, como gás natural e de nafta de petróleo. No cenário sob estudo, com esgotamento total de petróleo e gás natural, temos que criar novas tecnologias e processos para extrair H de biomassas renováveis, como pré-tratamento de celulose para geração de carboidratos que possam servir de base para extração de H e como fonte de energia para produção de calor de processo.

Para simplificar a análise, é feita uma revisão bibliográfica específica para uréia, o nitrogenado mais usado no Brasil. A literatura contém muitos estudos sobre os processos de produção de nitrogenados, com ênfase em processos, balanços de massa, e balanços financeiros. Poucos estudos focam o balanço energético, e não foi encontrado estudos detalhando a energia de movimentação e energia “upstream” nem “downstream” da cadeia produtiva.

Produtos nitrogenados vem em várias formas e formulações. Cada um tem suas características de energia, fração de N, fator  $F^1$  (VITTI, 2005), disponibilidade bioquímica, e características de condicionamento complementar de solo. Os principais produtos são amônia, ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio. A ureia é a mais usada no Brasil, e o seu principal insumo é a amônia. Neste estudo, é detalhado a energia do ciclo produtivo da ureia. Os outros produtos (sulfato e nitrato de amônio) também partem da amônia produzida. A produção da amônia é a fase em que se consome mais energia.

Deve ser observado que o Brasil tem grande dependência da importação de adubos agrícolas. No caso específico de nitrogenados, a proporção varia de 70% a 75% do total consumido anualmente (MAPA 2016; CONAB 2016a; FRANCO, 2007). No cenário usado neste estudo, sem energia fóssil disponível, não haverá energia para importação de adubos, e toda necessidade terá que ser suprida com produção local. Esta futura necessidade levanta o segundo detalhe, a necessidade de fonte abundante de hidrogênio para a formação da amônia, além da energia necessária para a sua síntese. (MENDES JÚNIOR, 2011; DIAS, 2006; FERNANDES, 2010; ROQUETTE FILHO,

---

<sup>1</sup> Fator F é a relação entre a quantidade física de um nutriente colocado no solo, e a disponibilidade real para a planta. Diversos fatores diminuem a disponibilidade real, tais como evaporação, hidrólise, conversão enzimática por microrganismos no solo. Para nitrogenados, o fator F típico fica ao redor de 2,0

2014; LOBO, 2008). Hidrogênio necessário geralmente vem da reforma catalítica de um derivado do petróleo (gás natural, alternativamente nafta petroquímico) com vapor de água superaquecido. Ambos são derivados de petróleo fóssil. Sem energia fóssil, a fonte de hidrogênio terá que ser de carboidratos renováveis, como alguma biomassa, com novos processos, com demandas desconhecidas de energia.

Segundo MENDES JÚNIOR (2011) 1,2% da demanda de energia mundial é usada para a produção de fertilizantes. Deste total, 92,5% é utilizado exclusivamente para a produção de nitrogenados. Estas proporções justificam a necessidade de um detalhamento do balanço energético de nitrogenados, além da necessidade do seu transporte por longas distâncias. Mesmo sem importação, as distâncias internas entre fábricas e o usuário final é da ordem de centenas de quilômetros (SOARES, 2009; SILVA, 2013; GARCIA, 2011), geralmente por meio rodoviário, agravando muito a demanda energética do uso do nitrogenado na agricultura. MENDES JÚNIOR (2011) tem diversos dados energéticos da revisão bibliográfica, com condições variadas como contabilização de energia elétrica e gás natural como insumo, das páginas 33 a 35, foi montada a Tabela 2-4:

**Tabela 2-4 Energia para produção de 1kg de Amônia**

kcal <sup>1</sup>	MJ <sup>2</sup>	Uso Elec <sup>3</sup>	Uso GN <sup>4</sup>	Transp	Ano <sup>5</sup>
18750	78,50	S	? <sup>6</sup>		1975
25000	104,67	S	?		1975
19111	80,01	S	N	120	1976
15247	63,84	N	N		1978
13875	58,09	N	N		1979
17808	74,56	N	S		1980
19200	80,39	S	N		1983
14930	62,51	N	N		1984
13480	56,44	N	S		1986
17520	73,35	S	N		1992

**Fonte: MENDES JÚNIOR, 2011**

<sup>1</sup> Normalmente os autores relatam a energia demandada em kcal, e não em MJ.

<sup>2</sup> Valor original em kcal convertido para MJ

<sup>3</sup> "S" indica que autor incluiu o consumo de energia elétrica no cômputo da demanda energética

<sup>4</sup> "S" indica que autor explicitou uso de Gas Natural como fonte de hidrogênio. Alternativamente pode ser nafta ou outra fonte de hidrogênio que tenha vantagens financeiras sobre gás natural

<sup>5</sup> Ano da referência bibliográfica é importante, pois a tecnologia tem avançado e melhorado a eficiência total do processo produtivo. Mesmo assim, não existe um decréscimo contínuo de energia ao longo do tempo, evidenciando grande variação de critérios de alocação de energia

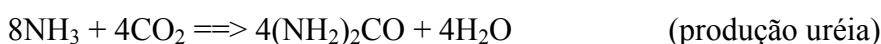
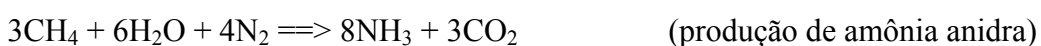
<sup>6</sup> Não foi possível determinar pelo texto se usa gás natural como fonte de hidrogênio

Usando os dados da Tabela 2-4, temos uma média de 73,24MJ/kg de N produzido como amônia. Esta média deve ser usada com cautela, pois as condições e hipóteses assumidas em cada estudo são diferentes, podendo contabilizar ou não energia elétrica e gás natural como insumo.

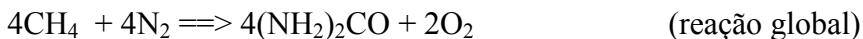
MENDES JÚNIOR (2011, página 38) mostra um diagrama com fluxo de insumos e energia, resultando em um valor final de 26.793kJ/kg (112,26MJ/kg) de ureia, equivalente a 240,557MJ/kg de nitrogênio elemental. O diagrama contém os diversos insumos e energias associadas para a produção de um kg de ureia. Esta referência relata uma intensidade de energia bem maior que a média da Tabela 2-3 acima.

Pelo diagrama da referência, temos uma proporção de 0,208 de N com 0,625 de H resultando em 0,833 de NH<sub>3</sub> que junto com 0,167 de CO<sub>2</sub> gera 1,000 de ureia.

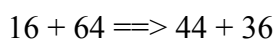
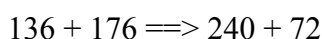
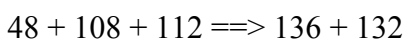
As equações estequiométricas para as duas etapas do ciclo completo são



-----



As massas de reagentes e produtos são respectivamente



Usando as reações estequiométricas, para cada kg de uréia, precisamos de 0,467kg de N e de 0,067kg de H, ou de 0,567kg de NH<sub>3</sub> (avaliando a 2ª reação apenas), valores estes diferentes da referência (MENDES JÚNIOR, 2011).

Diante das discrepâncias, foi feita uma estimativa teórica da energia necessária para a produção de um kg de uréia, assumindo as melhores práticas possíveis. Os valores calculados estão na Tabela 2-5 a seguir.

**Tabela 2-5 Energia direta produção Uréia**

Etapa	Energia MJ/kg ureia	Insumo	Massa kg/kg ureia	Observação
Amônia	11,113	GN	0,200	Energia combustão GN usada como insumo
	12,747	N <sup>2</sup>	0,467	Energia usada produção N <sub>2</sub> atmosférico
	1,551	H <sub>2</sub> O	0,450	Energia vapor água superaquecida
	22,700			Energia processo Haber Bosch
	- 4,445			Energia recuperada reforma GN para H <sub>2</sub>
Uréia	4,249	CO <sub>2</sub>	0,183	Energia GN para produção de CO <sub>2</sub> extra

**Fonte: Elaboração do Autor**

Somando as energias mínimas necessárias, incluindo um crédito estimado de aproveitamento de 40% da energia do GN usado como insumo<sup>1</sup>, temos um total de 47,9MJ/kg de uréia produzida. Em relação ao N<sub>2</sub> elementar disponível, temos um total de 102,7 MJ/kg de N<sub>2</sub>. Este valor é o valor teórico mínimo<sup>2</sup> para produção do nitrogenado uréia. Considera que todos os processos são adiabáticos, que não existe perda térmica, todos os processos químicos tem rendimento 100%, que tem aproveitamento perfeito da energia de combustão do gás natural. O processo de reforma de gás natural para extração de hidrogênio não é uma combustão do GN, portanto, é um limite teórico superior. Portanto, a energia calculada é um valor bem subestimado para a energia necessária para produção teórica do nitrogenado uréia.

Ainda falta a contabilização das energias indiretas de toda a infraestrutura industrial, movimentação de insumos, movimentação do produto final, manutenção.

O valor de 11,1 MJ/kg do GN como insumo é obtido usando 55,6 MJ/kg de CH<sub>4</sub> consumido. O valor de 12,7 MJ/kg de N<sub>2</sub> é obtido usando (FLOWE, 2017) equipamento comercial consumindo 100kW de potência em um compressor produzindo 100 pés cúbicos de N<sub>2</sub> por minuto com pureza acima de 99% usando tecnologia de membrana.

<sup>1</sup> Aproveitamento da energia do “flue gas” para energia de processo e para geração de energia elétrica. Embora não seja relatado na literatura, este autor considera que um projeto para maximizar rendimento teórico deve incluir em seu projeto o aproveitamento de toda a energia de gases que vão para a atmosfera

<sup>2</sup> Modelagem teórica por este autor assume que todos os processos são adiabáticos, que não existem perdas térmicas nos dutos, e que não precisou de energia para movimentação interna de produtos e uso de bombas e ventiladores.



O valor de 1,55 MJ/kg de H<sub>2</sub>O é a energia necessária para elevar e temperatura de água de 20 °C para vapor saturado a 130 °C a 2,7 bar, usando as energias de tabelas de vapor.

O valor de 22,7MJ/kg de amônia (FLOWE, 2017) é a energia necessária para obtenção de amônia a partir dos componentes H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, no processo Haber-Bosch.

O valor de -4,45MJ/kg é um crédito de energia assumindo, com as melhores práticas, que conseguimos aproveitar 40% de toda a energia de combustão do CH<sub>4</sub>/GN. Este valor é compatível com o rendimento de termelétricas a GN inauguradas na década de 2010.

O subtotal acumulado é de 43,7MJ/kg de NH<sub>3</sub> até agora. Para a produção da uréia, ainda precisamos de um complemento de 0,183kg de CO<sub>2</sub>. A energia necessária para a sua produção, tem valor proporcional de 4,25MJ/kg. Destes valores resulta em um total de 47,9MJ/kg de uréia como valor mínimo para energia de produção. Este valor não leva em conta a energia indireta da infraestrutura industrial, sua manutenção, sua vida útil, sua instalação. Também assume que os processos unitários sejam adiabáticos e não haja perdas nas tubulações.

São necessários 2,143kg de amônia para cada kg de N elemental. Como as referências de necessidade de nitrogenados são dados em kg de N elemental, temos o valor final de 102,675MJ/kg de N necessário para cada tonelada de cana ou por hectare.

A quantidade de N necessário varia conforme o cultivar usado, clima, e produtividade desejada, medido em toneladas por hectare colhida. A Tabela 2-6 ilustra a necessidade de adubação nitrogenada.

**Tabela 2-6 Necessidade de nitrogênio elemental por hectare por safra**

Referência	N kg/ha	Observação
COSTA, 2012	80	Min 60 max 120
OLIVEIRA, 2012a	75	Min 60 max 90 experiencias variando de 0 a 120 kg/ha
MACEDO, 2004	70	30kg cana planta, 80kg cana soca media $(30+4*80)/5$
SOUZA, 2010	79,5	Variando de 87,5 para cana soca para 47,5 para cana planta
VITTI, 2004	143	83kg no colmo, 60kg nas folhas
BENEDINI, 2008	90	50kg/ha cana planta 100kg/ha cana soca
VITTI, 2009	50	40kg/ha a 60kg/ha cana planta
VITTI, 2013	83,6	40kg/ha a 60kg/ha cana planta, 1,0 a 1,3 kg/ton colmo retirado em 92kg/ha pra 80ton/ha de colmo
ROSSETO, 2005	79	60 a 90 kg/ha cana planta, 1kg/ton colmo para cana soca
GARCIA, 2011	100	150kg N por 120ton cana
LUZ, 2012	60	60kg/ha solo SP varia conforme região estudada

**Fonte: Elaboração do Autor**

A média aritmética das referências da Tabela 2-6, resulta em um valor de 86kg/ha de N por colheita, incluindo a variação da necessidade de adubo aplicado na cana planta e na cana soca. Que é coerente com o valor adotado nesta dissertação, de 79,5kg de N elemental por hectare por safra em média (MACEDO, 2004), para manter a consistência da metodologia em Materiais e Métodos.

O valor de energia na produção de N na forma de uréia fica entre um mínimo teórico absoluto de 102,675MJ/kg e um máximo levantado em campo de 240,557MJ/kg (MENDES JÚNIOR, 2011), que leva em conta perdas reais de processos reais, mas ainda sem levar em conta a energia indireta da infraestrutura industrial.

Uma rápida análise de sensibilidade, exclusivamente para nitrogenados, mostra que uma variação a mais de 10% da energia de nitrogenados, diminui em 5% EROI final, mantido constante outros parâmetros. Por outro lado, uma variação a menos de 10% da energia do nitrogenado aumenta EROI final em 6%. Em resumo, EROI varia 0,5% a cada 1,0% de variação da energia dos nitrogenados. Por isso, é tão importante um estudo realmente detalhado da produção e uso de nitrogenados, e possível reciclagem de resíduos nitrogenados no campo.

## 2.14 Dados primários e resultados da Fase Agricultura

Os dados primários necessários para um balanço energético na fase agrícola passam pela definição das atividades agrícolas, equipamentos usados, intensidade de uso em horas por atividade por hectare, consumo de energia direta por hora de atividade ou por hectare, vida útil de cada equipamento, manutenção dos equipamentos, insumos agrícolas, e mão de obra necessária.

Atividade agrícola requer muitas etapas, nem sempre padronizáveis, varia conforme o terreno disponível, do clima predominante na região e do tempo a cada safra.

Os tipos de dados primários necessários para balanço energético desta Fase são relatados no Quadro 2-1:

**Quadro 2-1 Classe de Dados**

Tipo Dado	Definição
Cana	Parâmetros sobre a cana, como produtividade, necessidades de nutrientes, rendimento industrial
Energia Direta	Dados para cálculo de energia direta, como consumo de combustível, horas de atividade, produtividade por hectare
Energia Indireta	Dados para cálculo de energia indireta em equipamentos e infraestrutura, como tratores, implementos, caminhões, prédios, equipamentos industriais, insumos agrícolas
Indicador	Indicadores e parâmetros, geralmente adimensionais, como eficiências de equipamentos e processos, temperatura e pressão de vapor
PRM Auxiliar	Parâmetros auxiliares que não se enquadram nas outras categorias
Qty Insumo	Quantidade de insumos necessários para uma atividade ou processo. Quando são dados agrícolas, é dado normalmente em kg por hectare por safra. Quando são dados industriais, é dado normalmente em kg por tonelada de cana processada.
Transporte	Dados para cálculo de energia usada em movimentação de material físico. Inclui dados de distâncias, dados operacionais de veículos de carga, pois transporte e movimentação de grandes volumes de massas como nutrientes e corretivos agrícolas, cana e etanol produzido por centenas de quilômetros é um fator significativo de consumo energético

**Fonte:** **Elaboração do Autor**

O detalhamento da definição e valores de cada parâmetro estão no apêndice A1, assim como as devidas observações sobre validação dos dados coletados da literatura.

Importante notar que estes dados primários não contém energia calculada por outros autores ou referências. Estes dados permitem o recálculo das energias usadas em cada atividade. Esta metodologia permite a verificação da validade de cada dado energético, e comparar com os resultados relatados por outros autores.

## **2.15 Dados primários e resultados da Fase Industrial**

A fase industrial é muito mais padronizada, com processos relativamente bem definidos, com baixas incertezas operacionais uma vez estabilizados. Por ser autosustentável no consumo energético, baseado na queima do bagaço de cana em regime de cogeração, temos sempre vapor de processo e eletricidade necessários, havendo excedente de energia para venda a outros consumidores.

Justamente devido a esta autosuficiência, temos poucos detalhes sobre processos de usina autônoma, relatados na literatura sobre balanço energético de uma usina autônoma de E1G. A maioria das usinas é montada a partir de sistemas industriais “turn key”<sup>1</sup>, onde o comprador não monta a usina, mas compra um sistema completo, com garantia de parâmetros operacionais, mas sem detalhes sobre o seu projeto ou eficiência. Grandes fornecedores brasileiros como Dedini mantém os seus projetos como segredos empresariais, procurando divulgar o mínimo possível de detalhes técnicos. Desta maneira, o conhecimento técnico, é mantido longe da divulgação acadêmica, diminuindo a possibilidade de pesquisa e comprovação independente de eficiência energética de processos e sistemas. Dificulta muito os cálculos de energia indireta, por falta de dados sobre massas metálicas envolvidas, vida útil e manutenção.

Outro fator que aumenta muito a incerteza dos dados relatados é que a indústria brasileira de E1G sempre foi dependente de subsídio e financiamento governamental para implementação e renovação. Devido aos vários ciclos da implementação do uso de E1G automotivo no Brasil, temos usinas em vários estados de evolução técnica, desde usinas com equipamentos antigos, usando caldeiras de 22 bar, energia mecânica derivada de turbinas de vapor de processo, e ainda importando energia externa, até

---

<sup>1</sup> Sistemas “porteira fechada” onde o comprador especifica parâmetros de desempenho, e um fornecedor que tem o conhecimento para projeto e integração de subsistemas, entrega um conjunto completo, funcional, atendendo às especificações de desempenho desejado, além do treinamento operacional. Desta maneira, o comprador não tem muito conhecimento dos detalhes técnicos como peso, rendimentos termodinâmicos e outros parâmetros energéticos.

usinas “estado da arte”, usando caldeiras de alta pressão com 90 bar a 120 bar, com colunas de destilação integradas e otimizadas, com cogeração com turbinas de contrapressão e condensação no mesmo circuito, exportando energia elétrica excedente. Autores da literatura não se preocupam em especificar o tipo de equipamento industrial analisado, dificultando a análise de resultados muito díspares.

Grande parte das usinas são integradas às usinas de açúcar, é normal o aproveitamento do bagaço excedente da usina de açúcar (que não precisa de destilação nem fermentação) para alimentação da cogeração, gerando produtividade excessivamente otimista para energia elétrica da usina de etanol. Normalmente não é feita a separação dos dados por tipo de usina, o excedente relatado é da integração da usina de E1G com a usina de açúcar.

Os dados primários para Fase Industrial segue a mesma classificação usada na Fase Agrícola, mas os dados específicos agora focam em área construída, intensidade de energia de prédios e equipamentos, vida útil da infraestrutura, produção em toneladas por hora e toneladas por dia da usina.

A fonte primária dos dados foi MACEDO (2004), seguindo a mesma metodologia de cálculo e itens. Assumindo que no cenário hipotético desta dissertação, sem energia fóssil, foi assumido que a usina padrão está otimizada com estado da arte atual, com cogeração com 90 bar e 520 °C, vapor de processo a 2,5bar e 125 °C. Todos os dados de energia foram recalculados a partir de poucos dados primários da literatura.

Os detalhes numéricos são detalhados no Apêndice A1.

MACEDO (2007) informa para cada tonelada de cana processada, temos uma produção de 1.926,4MJ/ton de E1G, 176,0MJ/ton de bagaço excedente, e 9,2kWh/ton de eletricidade excedente para anos 2005/2006. O mesmo autor usa um rendimento de 40% de conversão entre PCI do bagaço e eletricidade disponível. A energia do E1G equivale a 86,35 litros de etanol anidro. Este valor já inclui o etanol derivado do melaço de açúcar da usina anexa (ver Seção 2-11 e Seção 5-6). No cenário de substituição total de energia fóssil, é necessária reduzir de 12 a 15 litros por tonelada de cana processada, pois o balanço energético real deve ser de uma usina autônoma. O valor de 176MJ/ton de bagaço, equivale a 23,34kg de bagaço por tonelada de cana, equivalente a 23,35kg de bagaço úmido ou cerca de 11,67kg de bagaço seco, ou seja, 9,17% de bagaço excedente.

MACEDO (2007) informa que a tonelada de cana tem 12,73% de fibra seca, equivalente a aproximadamente 255kg de bagaço úmido (50% de umidade), com PCI de 7,542MJ/kg (OLIVEIRA, 2013). Com caldeiras modernas de 90 bar e 520°C a 540°C,

com rendimento de 85%, temos 1.920MJ/ton de energia térmica bruta e 1.632MJ/ton de energia térmica líquida. Assumindo eletrificação total da usina, para máxima eficiência mecânica e energética, temos a necessidade de 40kWh/ton cana (MACEDO, 2004). Com o rendimento de 40% do bagaço para produção de energia elétrica (MACEDO, 2007), precisamos retirar 360MJ/ton cana dos 1.920MJ/ton brutos, resultando em apenas 1.560MJ/ton de energia térmica bruta. Retirando o que é considerado energia excedente (176MJ de bagaço excedente, 82,8MJ de eletricidade excedente, em um subtotal de 258,8MJ) temos uma energia para processos e perdas internas, de 1.301,2MJ. Usando uma tabela de vapor, para  $T=130^{\circ}\text{C}$  e  $P=2,7\text{bar}$ , temos  $H=2,720\text{MJ/kg}$  de vapor. Com 1.301MJ temos o suficiente apenas para 478kg de vapor de processo, sem considerar nenhuma perda de energia nos diversos dutos e processos. Este valor teórico máximo é compatível com os valores relatados na literatura, com cerca de 10% de energia térmica de bagaço excedente.

## **2.16 Dados primários e resultados da Fase Distribuição**

A fase distribuição é bem padronizada, só usa veículos de carga para distribuição de líquidos, embora esteja em curso a implementação de alcooldutos para movimentação de grandes volumes de fazendas e usinas, como a Região de Ribeirão Preto, até as grandes bases de distribuição, como Paulínea, com destino final para portos para exportação de etanol brasileiro (MILANEZ, 2010). Desta maneira se otimiza a distribuição e o custo (principalmente) financeiro, e indiretamente, o custo energético desta fase.

As distâncias médias entre usinas e distribuidoras, e entre distribuidora e postos de combustível é documentado em alguns estudos (GAMA, 2014), sendo a distância média entre usina e distribuidora de 268,35km, e a distância média da distribuidora até o posto de combustível de 68,93km.

Dados de veículos de carga, custos operacionais (tanto financeiro como energético), manutenção, vida útil, e capacidade, são bem documentadas, permitindo um cálculo com boa precisão do balanço energético desta fase.

Os dados primários necessários foram obtidos a partir de literatura de fabricantes, catálogos públicos, estatísticas de entidades de classe. O consumo de

combustível foi o item que precisou de mais verificações por ter uma grande variação. Pesos e intensidades de energia não teve grande variação, e vida útil foi estimado por levantamento de campo com empresas de transporte rodoviário.

Os detalhes numéricos dos dados necessários estão documentados no Apêndice A1.

## **2.17 Resultados de coprodutos na Fase Industrial**

A fase industrial gera dois coprodutos: E1G e energia excedente. E1G é o produto final. Energia excedente é padronizado nesta dissertação na forma de eletricidade disponível para exportação. Os dados numéricos da literatura variam bastante conforme o autor, alguns relatam bagaço excedente em percentual, outros relatam em energia equivalente de queima de bagaço, e finalmente alguns relatam energia excedente em eletricidade. A mesma energia útil disponível pode ter valores numéricos muito diferentes, pois conforme a medida usada (bagaço, energia térmica, eletricidade) as perdas de processos são ou não incorporadas.

ZUURBIER (2008) relata a produção de 8.100 litros de E1G por tonelada de cana processada, contra os 5.600 a 5.900 das safras 2015 e 2016 respectivamente (CONAB 2016a).

ZUURBIER (2008) relata excedente de 9,2kWh/ton cana processada em 2006 (33,12MJ/ton), e estimativa de 135kWh/ton (486MJ/ton) cana processada para 2020. Não informa se isso é energia térmica de bagaço ou se é energia elétrica livre para exportação à grade elétrica. O dado para ano 2020 inclui 40% de uso do palhiço do campo, mas não inclui a necessidade de energia para enleiramento, enfardamento, transporte até usina, limpeza de detritos minerais, para finalmente uso em caldeiras de alta pressão. A densidade do palhiço enfardado é de aproximadamente 1/3 da densidade da cana em colmos (palhiço enfardado com 138,5kg/m<sup>3</sup>) (MELLO, 2009). Recolhendo 10 toneladas de palhiço do campo é um trabalho para quase 10 horas de equipamentos com um consumo de mais de 4 litros de diesel por tonelada recolhida, gerando aproximadamente 72,2 m<sup>3</sup> por hectare para transporte. Usaria muito mais energia por tonelada de palhiço que a colheita do colmo, que é a atividade com a maior necessidade de energia direta e indireta de equipamentos. Não é realístico alocar 40% da energia

teórica do palhiço como crédito de energia, sem deduzir a energia indireta para a sua obtenção. MACEDO (2007) também aloca 40% da energia do palhiço sem alocar energia necessária para seu processamento no campo e seu transporte até a usina.

## **2.18 Agricultura Industrial**

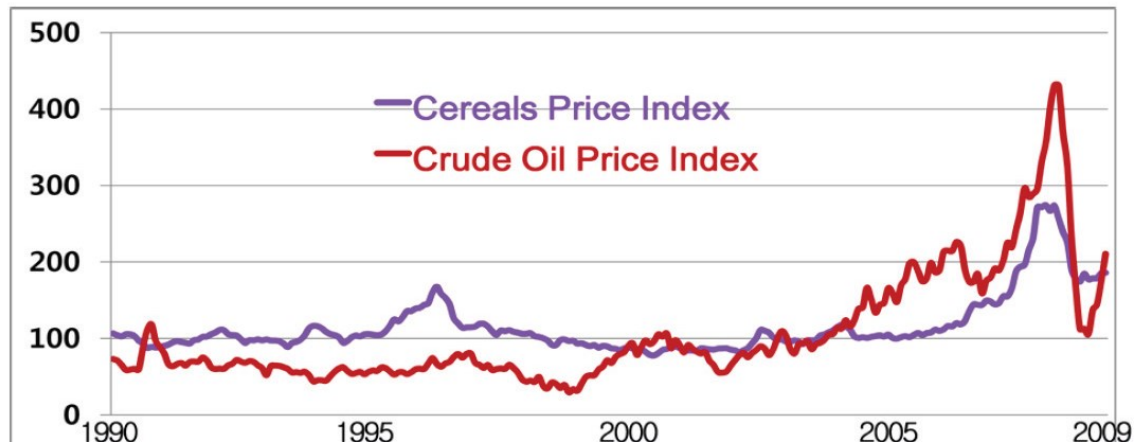
Agricultura Industrial é completamente diferente da agricultura familiar ou em pequena escala. No fundo, estamos usando terra física como uma infraestrutura fabril, onde se coloca os componentes para o produto final, a biomassa. Para isso, a planta tem que retirar carbono, hidrogênio e oxigênio em grande quantidade da água e da atmosfera. Porém também tem uma fração não desprezível de N, P, K, Ca, Mg, S (macronutrientes) em quantidades que chegam a centenas de quilogramas por hectare por ano. Além de micronutrientes minerais em pequena quantidade, na ordem de poucos quilogramas por hectare por ano. Além disso precisa de corretivos de solo para condicionar pH e capacidade de troca catiônica (MACEDO, 2010; SOUZA, 2010; VITTI, 2005; VITTI, 2009; VITTI, 2013; WALTER, 2008). Usam-se centenas de kg/ha/ano de insumos agrícolas, até 2,5 ton/ha/ano (MACEDO, 2004). A quantidade varia bastante dependendo da análise de solo na época de uso de insumos, depende do cultivar, depende do clima recente, depende da geologia do solo e lixiviação, e do relevo do terreno cultivado. Se obtivermos dezenas de toneladas por hectare por colheita, teremos que disponibilizar fisicamente os componentes exportados pela cana madura. Apenas C, O e H vêm direto da atmosfera e da água da chuva, os demais componentes da biomassa devem ser adicionados ao solo. Além disso, não se aplica os insumos como minerais elementares, mas na forma de sais que depois de hidrolisados, tem seus cátions e ânions disponíveis para absorção pela cana. Portanto, a massa aplicada é bem maior que a massa química necessária para cada elemento. Mais um agravante, nem sempre a totalidade dos insumos elementares usados fica completamente disponível para a planta, pois parte pode se transformar em produtos voláteis, ser lixiviada pela água, ser metabolizados por enzimas já presentes no solo e se recombinar com outros íons já presentes no solo. É o Fator F, já relatado na seção 2-13.

A Figura 2-8 mostra a correlação financeira entre preços de petróleo e preços de alimentos como cereais se correlacionam perfeitamente, reforçando a tese de que



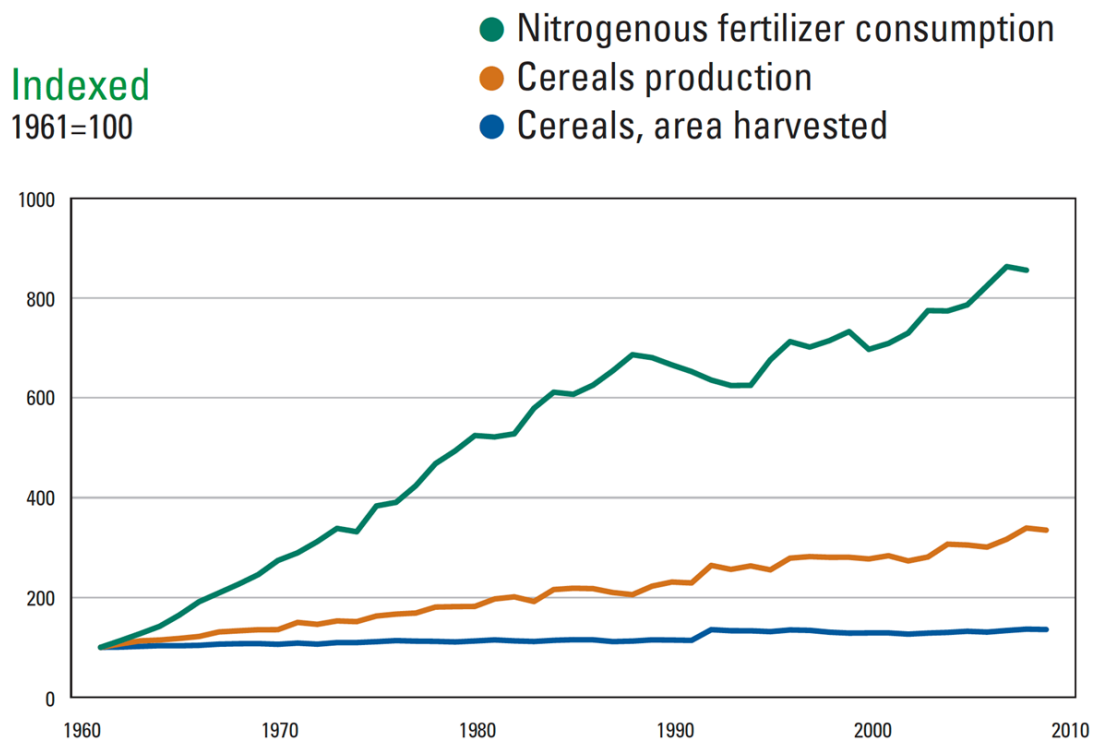
alimentos e agricultura são diretamente dependentes de energia fóssil. A Figura 2-9 demonstra como, para dobrar a produtividade em toneladas por hectare, foi necessário aumento de quase 9 vezes o uso de adubos (FAO, 2011). Além disso, existe uma correlação muito forte entre preço de petróleo e preço de alimentos, pois alimentos são basicamente petróleo transformado em comida (FAO, 2011).

**Figura 2-8 Dependência de alimentos e petróleo refletido no custo**



Fonte: FAO (2011)

**Figura 2-9 Relação de produtividade agrícola e uso de adubos nitrogenados**



Fonte: FAO (2011)

Assim, monoculturas são apenas fábricas bioquímicas com grande movimentação de insumos e nutrientes, uso do solo e energia solar para armazenamento de energia química, e movimentação de grande volume de massas como produtos finais (PFEIFFER, 2004). Com todos os impactos energéticos e ambientais de uma fábrica considerada poluidora.

A produtividade da cana em toneladas por hectare, varia bastante de região para região. Na Índia, rende aproximadamente 60 ton/ha/ano, no Estado de São Paulo a produtividade média fica ao redor de 80 ton/ha/ano até 100ton/ha/ano. No nordeste brasileiro, o rendimento pode ser tão baixo quanto 50ton/ha/ano (CONAB, 2016a). Esta grande variabilidade não é devido somente ao solo e clima ou ao cultivar, mas principalmente devido à quantidade de insumos agrícolas usados. Nem sempre o rendimento em ATR e bagaço compensa o custo financeiro dos adubos usados para a sua produção. Exatamente como em uma fábrica industrial tradicional.

## **2.19 Energia direta e indireta/embutida**

Literatura sobre produção agrícola brasileira foca muito em eficiência operacional e financeira, e não em consumo de energia. Agricultura industrial antecede muito a necessidade de energia de biomassa. Sob esta ótica, normalmente é considerado apenas a energia direta, visível, com custo financeiro, como óleo diesel e eletricidade. Insumos como adubos, tratores, implementos, caminhões, instalações, e infraestrutura em geral são contabilizados como custo financeiro, mas sem energia.

No entanto, muita energia foi necessária para a produção, movimentação, manutenção destes equipamentos de mecanização que viabilizam uma agricultura industrial, onde monocultura e latifúndio é a norma. Como esta energia indireta não é contabilizada, a energia aparente necessária para a produção de produtos agrícolas é muito subestimada, influenciando favoravelmente indicadores de sustentabilidade de biocombustíveis. De modo geral energia indireta é muito maior que a energia direta, distorcendo muito o indicador EROI e EFP.

O fluxo de energia para produção acelerada na agricultura é em média 50 vezes superior ao fluxo natural de energia (PFEIFFER, 2004). Infelizmente o rendimento da produção de biomassa não aumentou na mesma proporção. O mesmo autor, usando

dados americanos de 1994, relata que um americano médio precisa de 400 galões de óleo equivalente para suprir a sua alimentação, desdobrados na Tabela 2-7 a seguir.

**Tabela 2-7 Distribuição percentual energia necessária produção de alimentos**

Percentual	Alocação
31	Produção de fertilizantes inorgânicos
19	Operação de equipamentos agrícolas
16	Transporte do produto agrícola pronto para atacadista
13	Irrigação complementar
8	Pecuária excluindo alimentação dos animais
5	Secagem grãos
5	Pesticidas e herbicidas
8	miscelâneos

**Fonte: (PFEIFFER, 2004)**

O autor não considerou a energia necessária para embalagem, transporte até o varejo, refrigeração e conservação, e cozimento. Estes dados informados estão acima dos dados relatados por FAO (2011), que informa o uso de 72,1MJ/dia/pessoa só para produzir a alimentação diária, em ambiente americano, usando dados de USDA. Usando a estimativa de consumo de 400 galões de óleo equivalente por pessoa/ano para a cadeia alimentar industrializado, temos um dispêndio de energia de 147MJ/dia/habitante (PFEIFFER, 2004).

Outro exemplo da relação energia indireta pela energia direta é o caso de uma família brasileira urbana típica. Tem 4 pessoas, eletrodomésticos, fogão usando GLP ou GN, um carro e consumo de 100 litros de gasolina (equivalente) mensal. Usando médias fornecidos por associações de classe e fornecedores de energia, cada habitante urbano tipificado acima consome 23 MJ/dia de maneira direta, isto é, tarifado como gasolina (equivalente), gás e eletricidade. No entanto, cada pessoa consome uma média de 170 MJ/dia, calculado a partir dos dados do EPE (2015). A diferença, no valor de 147 MJ/dia, é a energia embutida. Em cada produto que consome, em cada kg de alimento que consome, na produção de cada objeto, na sua manutenção, no entregador que acaba de entregar a sua última compra pela internet.

Quase todos os autores, ao estudar sustentabilidade de energias renováveis, focam só na energia direta. Os poucos que ampliam o escopo para energia indireta, não ampliam muito as fronteiras do seu sistema, gerando indicadores muito otimistas de

sustentabilidade. Mesmo os estudos sobre LCA/ACV<sup>1</sup>, se preocupam mais com as emissões de CO<sub>2</sub>eq que com o balanço energético total.

## **2.20 Uso intensivo energia fóssil**

Praticamente todos os estudos acadêmicos, governamentais e de associações de classe sobre alguma energia considerada renovável, procuram demonstrar que usam menos energia fóssil que os concorrentes. Assim, contabilizam principalmente energia direta, a energia visível, com custo financeiro facilmente identificado. A energia indireta, embutida nos produtos e serviços necessários, normalmente não é mencionada, nem tão pouco contabilizada. Como exemplo de distorção, a fama de que um carro elétrico não é poluidor é um mito urbano. Um carro elétrico é mais eficiente no uso de energia direta (90% de rendimento de motores elétricos) do que um veículo usando motor de combustão interna (35% de rendimento da gasolina), porém a energia indireta da produção do veículo elétrico é muito maior, e a produção da eletricidade tem rendimento menor que 40% da energia primária, além da perda de 17% durante transmissão e distribuição (ANEEL, 2017). Somando tudo, o rendimento total da energia primária não é maior em um carro elétrico versus um carro com motor de combustão interna. A grande diferença é que a poluição atmosférica é deslocada para longe do centro urbano, mas não é eliminada.

Em 2016, praticamente toda energia direta e indireta vem de energia fóssil. Portanto, ao omitir, intencionalmente ou não, a energia indireta de um produto ou serviço, cada autor melhora o desempenho do seu indicador de sustentabilidade.

Basta lembrar que ao contratar uma pessoa para um dia de trabalho, esta pessoa já consome só de alimentos, 17 kcal ou 68MJ, e tem embutido mais uns 170 MJ de energia indireta no Brasil. Nenhum estudo pesquisado incluiu esta energia indireta, e poucos incluem a energia dispendida pela pessoa no trabalho manual ao substituir máquinas na mecanização da agricultura e indústria.

De maneira análoga, a maioria absoluta de autores sempre listam a energia dos combustíveis, mas poucos adicionam a energia embutida nos metais e materiais de

---

<sup>1</sup> ACV Análise de Ciclo de Vida, onde se analisa os impactos ambientais do ciclo produtivo completo de um produto ou serviço. A ênfase é impacto ambiental em termos de poluição e emissão de CO<sub>2</sub>eq, não em balanço energético

veículos, tratores e implementos, energia de edifícios e infraestrutura. Pouquíssimos autores se lembram da energia usada na fabricação e manutenção.

Finalmente, o caso mais omissos na maioria dos estudos da literatura, é o transporte de insumos até a área agrícola. Poucos autores até reconhecem a energia usada na movimentação interna de insumos e produtos dentro da fazenda, mas não foi encontrado nenhum estudo que leve em conta a movimentação de insumos agrícolas do fabricante até o depósito da fazenda. A distância média entre a fazenda consumidora e produtores de nutrientes fica ao redor de 500 km (SILVA, 2013). Ao pesquisar onde ficam os principais produtores de adubos e nutrientes, estes ficam perto das fontes de minérios, o que é uma obviedade econômica. E as fazendas ficam bem longe das minas, uma necessidade geológica e geográfica, além de ter que ficar perto de centros industriais e consumidores. Produtos como defensivos são produzidos também bem longe de fazendas, geralmente perto de polos petroquímicos, pois são produzidos geralmente como subprodutos da indústria petrolífera. Órgãos como MME<sup>1</sup>, IBGE<sup>2</sup>, ANDA<sup>3</sup> e outras relacionadas com recursos primários, tem bastante informação sobre produção e localização geográfica de fontes de insumos. O mais dramático é a importação de grandes quantidades de nutrientes do exterior. Para o Brasil os maiores fornecedores de nutrientes agrícolas estão no Canadá, Rússia e Oriente Médio. Distâncias da ordem de milhares de quilômetros, que mesmo por navio, consome muita energia para produtos de muito baixo valor agregado.

É indispensável incluir toda essa energia indireta, pois no cenário de longo prazo, quando esgotar totalmente toda energia fóssil, a relação entre a energia útil e toda a energia (fóssil ou renovável) usada para sua produção é um dos dois indicadores mais importantes para sustentabilidade.

Infelizmente, tem-se poucos dados confiáveis sobre intensidade de energia indireta em produtos e serviços. Temos dados sobre produtos semi-industrializados como metais ferrosos, cimento e agregados, petroquímicos, química em geral, mas são estudos estrangeiros, com tecnologia e métodos produtivos que não se replicam exatamente no Brasil. No exterior, predomina modal ferroviário, marítimo e fluvial. No Brasil, predomina rodoviário. Com intensidade energéticas muito diferentes. Nesta

---

<sup>1</sup> MME Ministério de Minas e Energia

<sup>2</sup> IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

<sup>3</sup> ANDA Associação Nacional Difusão Adubos

dissertação, foi feito uma estimativa sobre o custo energético de movimentação, com a infraestrutura brasileira e modal prevalente.

Outro agravante é que alguns insumos usam como matéria-prima justamente derivados de petróleo ou gás natural. Todos os insumos agrícolas (nutrientes, corretivos) são produzidos exclusivamente com energia fóssil, seja diesel, seja óleo combustível, seja maquinaria pesada produzida com energia fóssil. Por exemplo, os nitrogenados, usados em grande quantidade tanto na agricultura como na pecuária e avicultura, é feito extraíndo nitrogênio do ar por métodos energívoros mas também precisam do hidrogênio, que é retirado por reforma catalítica de gás natural. Um autor documentou uma fábrica de nitrogenados da Bahia, e quase todos os seus clientes estão em São Paulo. Só o ato de incluir a energia do gás natural quase dobrou a energia indireta dos nitrogenados em relação aos outros autores que estudam o mesmo tópico (MENDES JÚNIOR, 2011).

Como a movimentação de insumos e produtos é uma parte bem significativa da energia total necessária, é necessário notar que quase todos os estudos pesquisados incluem apenas energia de combustíveis, poucos incluem energia indireta do veículo, alguns incluem energia dos pneus, mas não foi encontrado nenhum que lembre que usamos vários conjuntos de pneus para a vida útil de um veículo de carga. A diferença é significativa entre incluir um conjunto de pneus e incluir 8 conjuntos de pneus. Nesta dissertação foi levantado a energia de produção do pneus, pesos médios, e energia para recauchutagem contra energia de produção, assumindo duas recapagens ou recauchutagens por cada pneu novo. Esta consideração abaixa a energia total por jogo de pneu usado, resultando em dados mais realistas.

## **2.21 Energia de produção, manutenção, movimentação e transporte**

Em quase todos os trabalhos científicos pesquisados, só incluem a energia usada localmente (só dentro da fazenda ou da usina). O custo energético externo está embutido no preço, mas não é uma relação direta entre energia indireta e o custo do produto. Mesmo procurando quantificar a energia indireta de insumos, alguns autores consideram energia de produção mas não consideram a movimentação do produtor até a fazenda ou até a usina.

Também o custo energético da manutenção normalmente é deixado à margem, embora abundem trabalhos sobre o custo operacional ou financeiro da manutenção de equipamentos. A fração da energia alocado à manutenção revelou-se uma fração altamente significativa da energia de produção, chegando em alguns casos a igualar toda a energia embutida nos metais e na fabricação, ao longo da vida útil do equipamento ou veículo. Os detalhes de energia de manutenção de equipamentos estão nos Apêndices 7-1 e 7-2.

## **2.22 Energia de serviços ambientais**

Finalmente, a energia indireta de serviços ambientais é mencionado em pouquíssimos estudos. Os poucos autores que se dedicam a explicitar esta energia, são os autores que se especializam sobre estudos de ecologia planetária, e autores que estudam o conceito de emergia (“energy”: embodied energy, toda energia solar embutida na cadeia produtiva incluindo serviços ambientais). No cenário sob estudo, emergia não afeta os resultados e conclusões. Porém, um serviço ambiental não pode deixar de ser mencionado e seu valor energético estimado: formação de solo.

Toda atividade de agropecuária envolve desgaste do solo. O primeiro pensamento que ocorre em geral é sobre o consumo de nutrientes como NPK além de Ca, Mg, S. Estes elementos são repostos por produtos industriais, em grande quantidade, no plantio e em cada safra. Mas tem um componente mineral que não é repostos, e o desgaste é invisível em um horizonte de anos e até décadas: erosão do solo fértil com granulometria adequada para cultivo.

Em média perde-se 0,4mm de solo por safra, ou aproximadamente 10 a 15 toneladas de solo por hectare, com uma média em 12 toneladas por safra por hectare (ZUURBIER, 2008; SANTOS, 2009; COHEN, 2005; POPPE, 2009). O intemperismo, responsável pela formação do solo, também é responsável pela erosão. Como a cana-de-açúcar precisa de pelo menos 1.500mm de chuva anual, podendo suportar até 2.500mm, tal quantidade não somente lixivia o solo e carrega nutrientes normais como amoniacais e íons necessários, como também leva o solo fino da superfície, em épocas de chuvas intensas. Por isso em média é necessário deixar quase metade do palhicho no campo entre uma colheita e outra, com funções de cobertura vegetal além de reciclagem parcial

de nutrientes. Quando hipoteticamente autores alocam energia do palhico no seu balanço de energia, alocam a energia de 40% do palhico do campo (ZUURBIER, 2008; MACEDO, 2007).

A formação de um solo necessita milhares a dezenas de milhares de anos de ação de intemperismo (ODUM, 2007; ODUM, 2000b; ODUM, 1996; ODUM, 2000a). E cada tipo de planta precisa de um solo com granulometria específica. Cana, por exemplo, precisa de um terreno com uma boa fração argilosa, outra fração siltosa, e pouca fração arenosa. Esta curva granulométrica permite um balanço correto entre permeabilidade da água, porosidade adequada para fixação de nutrientes temporários, firmeza mecânica para massa radicular, e fluxo gasoso suficiente para os microrganismos certos se desenvolverem, como os organismos fixadores de nitrogênio. Além de permitir a vida a colônias de organismos saprótrofos que voltam a mineralizar resíduos orgânicos.

Solo propriamente dito precisa de uma espessura útil de uns 2 metros pelo menos (VITTI, 2009). Porém como a granulometria não é constante, essa aumenta à medida que aumenta a profundidade. Desta maneira, o solo vai perdendo a sua fertilidade antes de perder dois metros por erosão. A perda de solo é um problema de milênios. A energia indireta da erosão do solo não é computada no balanço energético desta dissertação, por ser de várias ordens de grandeza acima das outras energias não ambientais.



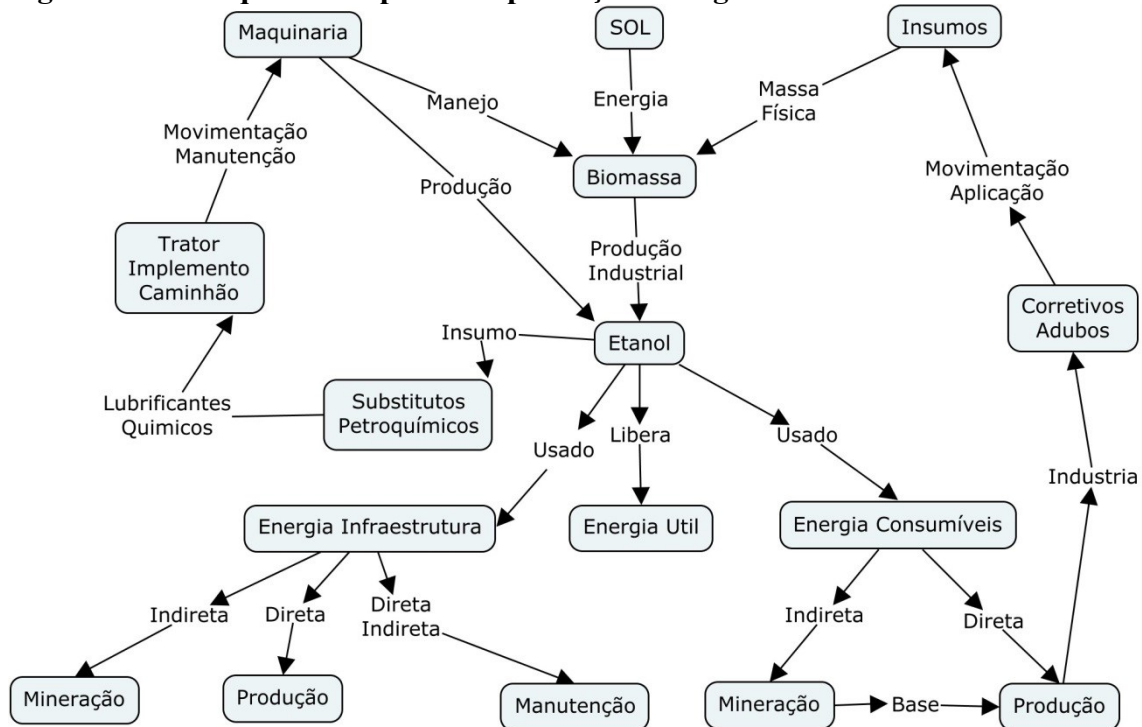
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O cenário para o estudo de real sustentabilidade, implica que toda a energia necessária para a manutenção da sociedade tecnológica necessária, todos os mecanismos de produção e uso intensivo de energia, não pode contar com energia fóssil, mas só com o a fração remanescente de toda a energia renovável que seja produzida. Uma grande parte da energia produzida terá que ser usada para manter a própria infraestrutura de produção, inclusive a produção de insumos intermediários.

Neste cenário, os indicadores atuais, como relação entre energia renovável e energia fóssil, e emissão de CO<sub>2</sub>eq por unidade de energia renovável produzida, perdem o sentido. Não existindo energia fóssil para subsidiar a produção de energia renovável, a relação mais importante é a relação energia total produzida pela energia total necessária para a sua produção. A emissão de CO<sub>2</sub>eq é irrelevante, pois sem energia fóssil, a quantidade de CO<sub>2</sub>eq na atmosfera e nos oceanos, já estará estabilizado.

A relação entre energia total produzida e a energia total usada, é denominada EROI na literatura. A Figura 3-1 ilustra, simplificada, o relacionamento entre os principais componentes de uma cadeia de produção de energia renovável

**Figura 3-1 Esquema simplificado produção Energia Renovável**



**Fonte: Elaboração do Autor**

Para um estudo justo da real sustentabilidade, é necessário o uso de dados confiáveis, e não apenas referenciando dados primários e secundários de outros autores. Sem a devida verificação de consistência e contexto, existe a possibilidade de propagar erros involuntários e estimativas erradas. Autores muito citados acabam criando um efeito de perpetuação de estimativas erradas, pelo efeito de “credibilidade por repetição”. Chega ao ponto de alguns autores calcularem um EROI otimista, que de tão repetido, é usado como ponto de partida para novos estudos.

Um grande esforço foi feito para gerar uma base de dados primários confiáveis, e sempre que possível, com faixa de variação. Os valores não são apenas referenciados, mas verificados em consistência interna.

Como exemplo de inconsistência interna, alguns autores relatam a energia alocada a corretivos agrícolas como calcário e gesso agrícola em MJ/kg, menor que a energia necessária para transportar a cana da fazenda até a usina. Como exemplo, SOUZA (2010) relata o uso de 400kg de calcário por hectare por ano, alocando 150MJ para o calcário. Estes valores resultam em 0,375MJ/tonelada de calcário, comparado com o valor aproximado de 10MJ/tonelada de cana transportado da fazenda até a usina. A distância de movimentação dos insumos agrícolas é em média de 500km (SILVA,

2013), contra 20km da distância média entre fazenda e usina (MACEDO, 2004). Alguns estudos sobre energia de mineração só leva em conta o combustível dos caminhões de carga, mas não relatam a energia dos explosivos usados, a energia de perfuração dos buracos para explosivos (um buraco a cada alguns metros, profundidades de vários metros por buraco). Muitas escavadeiras agora são elétricas, não mais a óleo, e a eletricidade não é contabilizada. A energia do beneficiamento local de minérios normalmente não é contabilizada. No caso do cimento, foram achados autores que relata a energia de produção do cimento menor que a energia necessária somente para a calcinação do “clinker”, que é a matéria prima bruta para a produção final do cimento.

### **3.1 Dados Primários e Secundários**

Dados primários são dados encontrados na literatura recente, ou levantados experimentalmente no campo, que não dependem de outros dados, que podem ser usados diretamente para calcular outros dados, ou servir de base para comparações e conclusões. Como exemplos, temos constantes físicas e químicas, energia de diesel e etanol hidratado, energia indireta de metais, de insumos agrícolas, de material de infraestrutura, de produtos químicos, de material rodante, distâncias entre produtor e consumidor de insumos, produtividade de biomassa de cana, rendimento de E1G por tonelada de cana, distância entre usina e fazenda, distância entre fornecedor de insumos e equipamentos e usuário na fazenda ou usina. Cada dado primário é verificado em consistência numérica, registrados os valores máximos e mínimos relatados, se possível explicação para tais valores extremos, e finalmente é feita uma escolha justificável de um valor a ser usado.

O fato de muitos autores usarem dados secundários de outras referências sem uma cuidadosa verificação acaba gerando uma propagação cumulativa de erros numéricos. E ironicamente, quando uma certa referência, de tanto ser citado, acaba se transformando em um “gold standard”<sup>1</sup>, sendo usado por outros autores sem preocupação em procurar valores alternativos, ou sequer suspeitar de algum erro. Neste

---

<sup>1</sup> Gold Standard, uma informação ou dado que de tanto ser repetida e divulgada, passa a ser um padrão não mais questionado

caso, perpetua-se um erro não intencional em um círculo vicioso muito difícil de romper.

Uma pista para a necessidade de revisar um determinado dado, é quando algum valor ou indicador estiver muito distante de outros indicadores na mesma categoria. Por exemplo, por que existe tanta energia indireta em alimentos e tão pouco em energia renovável? No entanto, bioenergia, que é composta na maior parte pela cadeia alimentícia, tem valores de energia indireta muito menores que a energia de alimentos, e isso sem contar a fase industrial.

Outro exemplo é quando a mesma bioenergia em vários países tem rendimentos de processo muito diferentes usando biomassas semelhantes. Não existe diferenças de tecnologia tão grandes, nem processos bioquímicos tão díspares, que justifiquem esta diferença. Na Índia, rendimento agrícola de E1G é cêrca de 30% menor que a brasileira. Índia não tem o lucrativo mercado automotivo para E1G e é antieconômico usar muito adubo para maximizar produtividade. Com muita água e muito nutriente, é possível aumentar em 50% a produtividade agrícola (OLIVEIRA, 2012a).

Dados primários de estudos não brasileiros são usados mas com ressalvas, pois existem diferenças de tecnologias e produtividades industriais entre Brasil e outros países. Quanto à produtividade industrial da indústria sucroenergética brasileira, assumiu-se que no cenário futuro, todas as usinas estão com a melhor tecnologia possível, com o melhor rendimento industrial, com eletrificação total para máximo rendimento mecânico e energético, todos usando difusão para extração de açúcar, e com caldeiras de última geração com 90 bar ou acima, com temperaturas de 520 a 540 graus centrígrados, com cogeração com turbinas de contrapressão seguido de turbinas de condensação, com extração de vapor de processo só nos ramais de baixa pressão.

Dado secundário, é todo dado derivado de outros dados, tanto dados primários como secundários já calculados. Como exemplos, podemos citar energia de preparo de terreno, energia de colheita, energia industrial, energia de transporte. Geralmente são cálculos complexos e com vários níveis, daí a importância de dados primários muito confiáveis, e parâmetros para facilitar correção de erros numéricos. Os indicadores de sustentabilidade mencionados anteriormente, são parte dos dados secundários calculados.

Cada dado primário e secundário é registrado com valor máximo, valor mínimo, e valor adotado para cálculo dos resultados parciais e finais. É possível estudos futuros

de sensibilidade e faixa de resultados possíveis, além de apontar as áreas onde um esforço de otimização pode produzir melhores resultados na intensidade energética.

Ressalve-se que por ter poucos estudos detalhados na literatura sobre energia indireta, em alguns casos foram utilizadas médias setoriais de consumo energético para algumas intensidade de energia.

### **3.2 Verificação de Dados Primários**

Para garantir a cadeia de confiabilidade dos dados, a credibilidade dos resultados finais, e para dar firme respaldo às considerações e conclusões finais, é indispensável que os dados primários sejam os mais corretos possíveis. No caso de haver grande variação entre valores máximo e mínimo, ou no caso de suspeita do valor ser subdimensionado, então é feito um esforço adicional para recalculá-lo a partir do estudo da cadeia produtiva do produto ou serviço. Alguns exemplos, por serem insumos fundamentais, é a energia de metais, insumos agrícolas, nitrogenados. No caso de ferro e aço, o valor máximo é quase o triplo do menor valor. No caso de nitrogenados, a energia dos insumos como gás natural, não foi contabilizado como energia indireta. Ainda no caso de nitrogenados, a literatura especifica a necessidade do nutriente N (nitrogênio) é dado em kg/ha ou kg/ton cana de nitrogênio elementar, não em termos de um produto padronizado. Isso acontece porque existem vários nitrogenados disponíveis, cada um com uma relação diferente de massa de composto e nitrogênio disponível, e com propriedades diferentes de correção auxiliar de solo e de disponibilidade agrônômica após deposição. Um outro exemplo é a energia de gesso agrícola, onde, ao agregar a energia indireta da produção do ácido sulfúrico, na proporção estequiométrica, praticamente dobra a energia embutida no gesso agrícola. Outro problema recorrente encontrado nos valores de dados primários é a fronteira muito limitada das referências encontradas. Como exemplo, quase todos os estudos sobre energia embutida em metais ferrosos só incluem a energia usado na usina de ferro doce (pig iron), que realmente acaba com cerca 30% a 40% da energia final do aço. Não foram contabilizados energia de mineração, transporte do minério bruto, beneficiamento na mina (com pulverização mecânica do minério, separação do ferro por meios magnéticos, do mineral “inerte”, peletização e sinterização).a energia de conformação

do metal (como processos de têmpera, forja, usinagem, acabamento, prensagem, torneamento) usa muito mais energia por kg que a produção do aço original (ZVI, 2015), principalmente em motores, caixas de cambio e transmissão, eixos, e outras partes estruturais. Na energia de transporte de adubos, o peso do inerte não é contabilizado pela maioria dos autores. Por exemplo, um adubo 5-10-20 tem, em uma massa de 100 kg, 5kg de nitrogênio equivalente, 10 kg de  $P_2O_5$  equivalente, e 20 kg de  $K_2O$  equivalente, sendo usado entre 55 kg a 60kg de inerte, para completar a massa de 100 kg. Embora este inerte não afete a ação do nutriente NPK formulado, muda muito a energia necessária para o seu transporte, praticamente dobra a massa a ser transportada a longa distância e na aplicação no campo. Por falta de informação sobre as formulações NPK mais usadas, esta dissertação procura ser conservador e trata a movimentação dos insumos agrícolas sem inertes.

Quase todas as referências não consideram a energia da movimentação dos produtos. A energia está embutida no preço, mas não é contabilizado como energia necessária para a produção do insumo. Esta subestimação quase sistemática de valores energéticos de dados primários, embora não intencional, reflete-se de maneira cumulativa nos dados secundários.

Nenhum esforço foi feito para contabilizar emissões de  $CO_2eq$ . Existem inúmeros estudos em LCA sobre emissão de  $CO_2eq$ . O fato de emitir aparentemente pouco  $CO_2eq$  não torna a energia sustentável a longo prazo, no cenário de extinção de toda energia fóssil.

Foi feito reestimativa de energia indireta para petróleo, gás natural, metais ferrosos, cimento, tratores, caminhões, implementos e pneus. Tal cuidado é justificado porque qualquer variação de valor em dado primário é amplificado pelo múltiplo uso no cálculos de dados secundário, o erro se acumula em cascata.

### **3.3 Vetor Energia Total**

A energia necessária para cada atividade do ciclo completo de produção de E1G de cana-de-açúcar, é calculada somando 9 (nove) componente. Cada atividade tem energia multicomponente conforme Quadro 3-1.

**Quadro 3-1 Vetor Energia e seus componentes**

Componente	Descrição
Energia Direta (Fossil)	Energia usada ao consumir energia direta como diesel, gás natural, gasolina, eletricidade, enfim, a energia diretamente mensurável tanto fisicamente como financeiramente
Insumos agrícolas e industriais (Ins)	Energia total embutida na produção de insumos como adubos, calcário, gesso agrícola, defensivos, químicos industriais. A fronteira foca no processo industrial em si
Embutida em trator incluindo produção e manutenção (Trator)	Energia total de um trator, incluindo energia dos metais, dos pneus, na sua produção, manutenção ao longo da vida útil. Não inclui energia de diesel
Embutida em implemento agrícola incluindo produção e manutenção (Impl)	Energia total de implementos agrícolas nos mesmos moldes do trator. Especificamente não foram estimados energia de implementos com rodantes, por falta de informação sobre o seu uso na lavoura de cana-de-açúcar
Embutida em equipamentos rodoviários (Rod)	Energia total para produção e uso de equipamentos de carga rodoviária como caminhões. Energia de múltiplos jogos de pneus e recapagens ao longo da vida útil do equipamento rodoviário é considerado. Este componente foca no transporte de produtos e coprodutos como cana, palhiço, etanol final, e assemelhados
Embutida no transporte insumos (MovIns)	Energia devido à movimentação do produto físico desde produção até entrega na fazenda. Este componente foca na movimentação de insumos agrícolas e produtos semi-acabados como minério e assemelhados
Embutida em infraestrutura agrícola e industrial (Infra)	Energia de infraestrutura como dutos, bombas, edifícios, equipamentos pesados. Relevante na fase industrial, pouco relevante na fase agrícola. Não calculado para atividades da fase agrícola por falta de dados confiáveis na literatura
Embutida em Recursos Humanos (Human)	Energia necessária à existência da força de trabalho de trabalhador humano. Valor usado foi 8MJ/pessoa/dia trabalho, que é bem menor que o valor real, mas adotado para minimizar discrepâncias muito grandes com outros estudos brasileiros. Este componente foi ofuscado pela hipótese de mecanização máxima a longo prazo, para maior eficiência produtiva
Serviços Ambientais como erosão (Ambi)	O único item considerado realmente é a perda de energia na erosão. É usada a energia estimada de formação de solo. A muito longo prazo, provavelmente milênios, na taxa atual, não haverá solo cultivável suficiente para fixação mecânica da cana no solo. A formação do solo por meio do intemperismo pode levar de dezenas a centenas de milênios para formação

Fonte: Elaboração do autor

Se um determinado componente da energia não era relevante ou necessário, o valor é assumido como zero. Esta organização dimensional tem várias vantagens. É mais fácil de analisar qual é a componente que mais impacta a energia de uma atividade ou grupo de atividades ou uma fase inteira (análise horizontal). Também facilita detectar qual atividade é mais impactada por um determinado componente do vetor (análise vertical).

### **3.4 Recálculo de Dados Secundários**

Cada dado secundário foi calculado com metodologia explícita no Apêndice A2, onde cada dado secundário (energia total de uma atividade, um indicador de desempenho, etc) é definido e a equação do seu cálculo e componentes são explicitados, permitindo a reprodutibilidade dos resultados secundários por outros pesquisadores.

Recálculo dos dados secundários é uma fonte de discrepância entre os resultados deste estudo e dos valores reportados pela literatura. Detalhes nos Apêndices em cada dado primário e secundário. Muitos autores relatam os dados secundários de outros autores, sem a verificação de consistência com os dados primários usados e a metodologia declarada.

### **3.5 Parâmetros**

Parâmetros são valores derivados de dados primários, que são calculados e depois usados como dados intermediários que não variam ao longo da dissertação. São calculados e guardados para economizar tempo e complexidade no cálculo de dados secundários, e para evitar erros de digitação.

Como exemplos, temos energia de aço, pneus, produtividades agrícolas e industriais, consumo de veículos de carga, consumo de tratores, colheitadeiras, peso médio de veículo de carga, peso médio de tratores por faixa de potência, vida útil de tratores, implementos, veículos de carga virtuais considerados representativos para uma atividade.

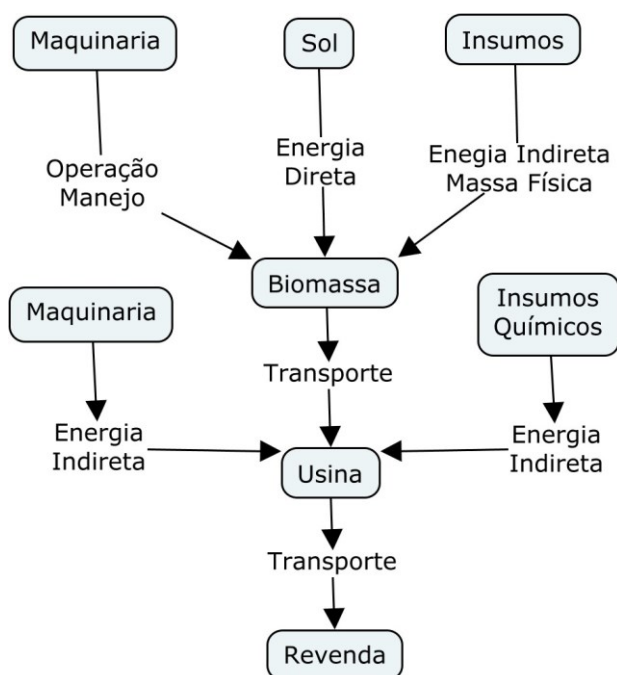


A existência de parâmetros é importante também para fazer análises de cenários. Basta variar alguns parâmetros e temos resultados completos de novos indicadores e subtotaís, além de novas sensibilidades aos parâmetros de entrada no novo ponto de operação do sistema.

### 3.6 Ciclo Produtivo

O ciclo produtivo de E1G é dividido em três grandes fases, com fronteira, entradas e saídas definidas. São a fase Agrícola, a fase Industrial e a fase Distribuição. Respectivamente produzem biomassa, transformam a energia primária da biomassa para energia secundária do E1G, entregam a energia na forma de E1G ao consumidor final. A Figura 3-2 mostra as três fases do ciclo produtivo e seu relacionamento.

**Figura 3-2 Ciclo Produtivo Atual usando energia fóssil**



**Fonte: Elaboração do Autor**

A fase Agrícola é a fase que produz a biomassa, usando energia solar para fotossíntese, combinando insumos inorgânicos com maquinaria industrial para produzir biomassa contendo energia química, na forma de cana em pé. Substitui a fase de

extração de energia fóssil. É a fase onde se usa a maior parte da energia consumida na cadeia produtiva inteira. A maior parcela usada não é a energia direta, visível, usada na operação da lavoura. A maior fração da energia usada está na energia indireta de produção de insumos e sua movimentação por grandes distâncias. A energia fóssil indireta está embutido nos preços, mas não é refletido no balanço energético, só se reflete no balanço financeiro. A fronteira da fase agrícola é estendida até a mineração de insumos básicos, produtos petroquímicos, produção de nutrientes, produção de equipamentos, movimentação de massas incluindo transporte da cana até a usina. Os coprodutos da Fase Agrícola são os colmos, que contém duas formas de energia: sacarose e bagaço, sendo que normalmente a energia do bagaço é ligeiramente maior que a energia da sacarose.

A Fase Industrial é a fase que transforma a energia química da biomassa em energia secundária útil, como etanol, usando infraestrutura industrial e insumos químicos e equipamentos de movimentação interna. É a fase equivalente ao refino na petroquímica e beneficiamento de carvão mineral. É uma tecnologia madura, baseado em transformação bioquímica usando microrganismos como leveduras específicas, seguida de uma etapa de purificação por destilação. A fronteira inclui a usina, e é ampliada para incluir os produtos químicos industriais necessário para tratamento do caldo e purificação, além da produção dos equipamentos e infraestrutura necessários para produção e manutenção.

A Fase Distribuição é a fase que movimenta o E1G da usina até as distribuidoras atacadistas, e daí até os postos revendedores. Esta fase usa um único equipamento, caminhão tanque, com capacidades variadas entre 15.000 litros a 60.000 litros por veículo. Nesta fase não foi incluso balanço energético do posto de combustível, apesar de fazer parte da cadeia produtiva até o consumidor final. Esta fase ganhou importância, pois a densidade de energia em MJ/litro de E1G é apenas 60% da densidade de energia da gasolina ou diesel. Portanto, tem-se que usar muito mais energia para movimentar a mesma energia desde a usina até o consumidor final. A pulverização de usinas pelo território nacional, contrastando com a concentração de poucas refinarias com sua infraestrutura de dutos, aumenta a importância de otimização desta fase. Transporte por dutos requer uma energia muito inferior ao transporte por caminhões. Não é possível aumentar o tamanho das fazendas e das usinas de etanol para viabilizar dutos de combustível, pois aumentaria muito a energia usada para transportar a cana da fazenda até a usina. Atualmente, a fazenda economicamente viável tem entre 30.000 a 50.000

hectares (PECEGE, 2012), com distâncias de 20 a 30 quilômetros entre local de colheita e portal da usina.

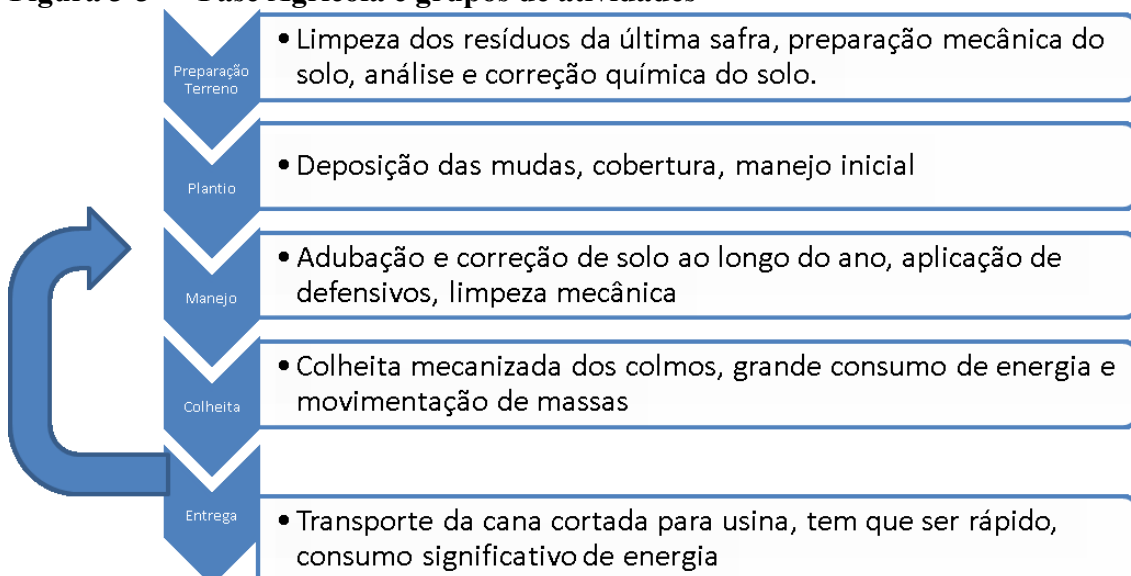
### **3.7 Detalhamento da Fase Agrícola**

A fase agrícola é a fase que produz a biomassa, tendo como entradas muita energia solar, CO<sub>2</sub> atmosférico, água, e nutrientes minerais aplicados no campo, e tem como saídas cana-de-açúcar em colmos, além de palhiço no campo e massa radicular. Esta é a fase que mais consome energia indireta, principalmente pelo uso intensivo de equipamentos, nutrientes, corretivos de solo, defensivos agrícolas, e movimentação de insumos até a fazenda e da biomassa até a usina. É a fase que tem mais atividades, a maior variação de produtividade por sofrer influências não controláveis do clima, plantas invasoras, insetos, doenças vegetais e manejo por humanos.

O ciclo usual é de 6 anos, com 5 colheitas, com uma grande etapa de reforma e replantio do canavial, uma colheita de cana planta, e quatro colheitas de cana soca e resoca. Embora variando um pouco com o cultivar usado, clima local e manejo, de um modo geral, após a quinta ou sexta colheita, a produtividade em toneladas por hectare fica baixa demais, sendo antieconômico.

A Fase Agrícola, esquematizada na Figura 3-3, é dividida em 5 grupos de atividades: preparação do terreno, plantio, manejo, colheita e entrega. O número de repetições de cada grupo não são iguais. Preparação de terreno e plantio são executados apenas uma vez por ciclo. Os outros 3 grupos são executados 5 vezes, uma a cada colheita.

**Figura 3-3 Fase Agrícola e grupos de atividades**



**Fonte: Elaboração do autor.**

Preparação de terreno tem por objetivos limpar e reformar o terreno após a última colheita do ciclo, colocando-a em condições físicas e agrônômicas para um plantio de mudas de cana. Inclui remodelação física e condicionamento do solo com corretivos agrícolas e nutrientes iniciais. Este grupo é um grande consumidor de energia, não só pela quantidade de atividades diferentes, uso de grande quantidade de equipamentos e insumos, e pela grande movimentação física de insumos agrícolas e movimentação física de terra como preparação mecânica do terreno.

Plantio é a disposição das mudas de cana nas áreas preparadas, cobertura com terra, e um manejo inicial com químicos. Embora conceitualmente seja um grupo diferente, na prática, muitas vezes é executada com a última atividade típica de preparo de terreno, usando equipamentos combinados que fazem distribuição de insumos agrícolas e mudas na mesma operação física. Não se economiza muita energia, mas ganha tempo e custos.

Manejo é o grupo que complementa a nutrição da plantação antes de cada colheita, efetua controle de pragas e plantas exógenas com defensivos agrícolas, análise de solo contínuo, eventuais limpezas de terreno, e controle de erosão. Este grupo é executado do fim de uma colheita até o início da próxima colheita. No fim do ciclo de 6 anos, cede lugar ao grupo preparação de terreno para novo plantio.

Colheita é um grupo onde é feita a extração da biomassa produzida industrialmente, equivalente à extração de energia fóssil com perfuração de poços ou

mineração de carvão. É um grupo que consome muita energia com equipamentos de alta potência e alto consumo, tanto de combustível como desgaste de equipamentos.

Entrega movimentada a biomassa beneficiada (colmos e toletes) até o seu consumidor final, a usina industrial de E1G. Restrições econômicas forçam a distância entre fazenda e usina a ficar ao redor de 25 km.

Esta fase agrícola é onde existe a maior discrepância tanto de dados primários como de fronteira do sistema. É a fonte de maior incerteza que influencia os resultados finais. Em compensação, é a fase onde existe as maiores oportunidades de melhorias e otimizações, principalmente na área de reciclagem de nutrientes e uso de energia local.

A maior fonte de variação de dados primários, para uma determinada fronteira, é a não inclusão de energia indireta de insumos agrícolas (incluindo transporte a longa distância) e a não inclusão de energia indireta de equipamentos e manutenção.

No cenário deste estudo, sem energia fóssil, é assumido que não haverá energia suficiente para importação maciça de insumos agrícolas, como ocorre atualmente em 2017. Por isso, energia de transporte de insumos por importação marítima não foi incluído no balanço de energia.

A nomenclatura das Atividades segue o mais perto possível da nomenclatura adotada por MACEDO (2004).

### 3.7.1 Grupo Preparação de Terreno

O grupo é dividido em atividades, conforme Tabela 3-1.

**Tabela 3-1 Atividades do Grupo Preparação de Terreno**

1	Aplicação de calcário
2	Eliminação mecânica soqueira
3	Eliminação química de soqueira
4	Gradagem pesada
5	Subsolagem 3
6	Gradagem pesada II
7	Gradagem pesada III
8	Gradagem de acabamento
9	Sulcação e adubação

**Fonte: Elaboração do autor.**

A nomenclatura das atividades da fase agrícola segue os mesmos nomes usados em uma referência bibliográfica (MACEDO, 2004).

Aplicação do calcário é a denominação para um conjunto de atividades separadas, visando ao condicionamento químico do solo antes do plantio. Uma tarefa implícita em todos os grupos é Análise de Solo, onde é feito o levantamento do estado químico e bioquímico do solo. Nesta análise de solo, é determinado não só as frações de elementos químicos como N, P, K, Ca, Mg, S, e micronutrientes, além de Al e CTC (Capacidade Troca Catiônica). CTC expressa a capacidade de neutralização de Al no solo, que desloca e diminui atuação de macronutrientes como Ca e Mg. Esta análise de solo é feito por amostragem planejada, de preferência com separação por subáreas com características orológicas semelhantes. Em Agricultura de Precisão, uma fazenda de 30.000 a 50.000 hectares é dividido em glebas definidos pelas características de relevo e disponibilidade hídrica, não necessariamente com a mesma área em cada gleba, e planejado condicionamento de solo específico para cada gleba para maximizar retorno financeiro, juntamente com planejamento do cultivar a ser aplicado em cada gleba. Nesta atividade, aplica-se não somente calcário, como também é aplicado gesso agrícola para condicionamento do solo para melhorar a penetração da massa radicular e melhorar CTC. Quanto maior a penetração da massa radicular no solo, geralmente maior a produtividade da cana e melhor aproveitamento dos insumos agrícolas. Também é aplicado os macronutrientes iniciais antes do plantio.

Eliminação Mecânica de Soqueira é a atividade que destrói a massa radicular da cana plantada no ciclo anterior. Esta atividade consome mais energia direta e indireta que a Eliminação Química, mas tem a vantagem de reciclar nutrientes no solo.

Eliminação Química tem menor custo financeiro mas perde nutrientes, e precisa de tempo para neutralização dos químicos, obrigando a uma rotação de glebas.

Gradagem pesada usa implementos que penetram profundamente no solo, destorrandoo profundamente e diminuindo a compactação feita pelo uso intensivo de mecanização, principalmente na colheita.

A maioria das atividades se destinam a descompactação do solo (compactado pela passagem de máquinas pesadas, principalmente da colheitadeira que pesa entre 18 a 22 toneladas, além dos veículos de carregamento e transbordo, muito pesados quando carregados até a capacidade máxima), movimentação física de solo para profundidades diferentes (trazendo solo profundo para superfície e vice versa) procurando aproveitamento integral de minerais. Tem atividades também de nivelamento de terreno

(para facilitar trânsito de máquinas no manejo e para diminuir erosão por escoamento superficial) e abertura das valas para deposição de mudas.

Este grupo de atividades é executado a cada 6 anos e a energia direta e indireta é rateada por 5 colheitas.

### 3.7.2 Grupo Plantio

Este grupo de atividades resulta no plantio direto. Inclui transporte de mudas do viveiro até o local de plantio, assumindo que os sulcos já estão abertos e limpos, e o terreno já foi preparado e condicionado. A energia indireta das mudas é estimado em 3,5% da energia total usada. É estimado uma necessidade mínima de 8 toneladas, um máximo de 18 toneladas. Foi adotado o uso de 12 toneladas de mudas por hectare (MENEGUETTI, 2010; MACEDO, 2004; SOUZA, 2015), pela produção de 5 colheitas a 76 toneladas por hectare (CONAB 2016a). A relação de 12 toneladas de mudas para 380 toneladas de cana colhida em 5 colheitas resulta nos 3,5% de energia total usada como energia de mudas. A distância do transporte é assumido ser 20 quilômetros (MACEDO, 2004), ou seja, é assumido uma fazenda média de 40.000 hectares, e esta é a distância média de percurso dentro da fazenda. As atividades incluem transporte de mudas, uso de trator pequeno para distribuição de mudas, ou uso de um trator médio para distribuição simultânea de químicos e mudas. A atividade de cobertura das mudas com terra pode ser feita manualmente (mais barato financeiramente em algumas regiões geográficas) como pode ser feita de maneira mecanizada, com implemento específico que libera as mudas e simultaneamente cobre com terra na profundidade adequada. Esta atividade não consome muita energia pelo uso de equipamentos relativamente leves.

As atividades do grupo Plantio estão listados no Tabela 3-2.

**Tabela 3-2 Atividades do Grupo Plantio**

1	Distribuição de mudas
2	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida
3	Cultivo químico (aplic. de herbicida)
4	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)
5	Operações para tratamentos culturais de cana soca

**Fonte** Elaboração do autor

Sulcação é a atividade que abre sulcos no solo, abaixo do nível médio, com 20cm a 30cm (VIOLANTE, 2012), com distância entre valas apropriadas para colheita mecanizada.

Distribuição de mudas é a colocação das mudas nos sulcos, de maneira uniforme, nos sulcos formados no solo para o plantio. Pode ser feita manualmente ou mecânicamente. Aqui se assume que é sempre uma atividade mecanizada para máxima eficiência produtiva.

Fechamento do sulco e aplicação de inseticida é a atividade de cobertura das mudas com 20cm a 30cm de terra (VIOLANTE, 2012) com aplicação simultânea de inseticida. Quando mecanizada a cobertura e aplicação de inseticida é simultânea.

Cultivo químico (aplicação de herbicida) é a atividade de aplicação de defensivos para evitar que plantas invasoras se instalem antes da brotação das mudas de cana. (MACEDO, 2004)

Este grupo de atividades é executado a cada 6 anos e a energia direta e indireta é rateada por 5 colheitas.

### **3.7.3 Grupo Manejo**

Este grupo incorpora as atividades de cuidado contínuo da plantação entre uma colheita e outra. Tem distribuição e aplicação de defensivos agrícolas, complementação de nutrientes, análises de solo, e limpezas esporádicas de terreno para eliminar pragas, insetos e plantas invasoras. Consumo de energia é relativamente pequena pois só usa tratores de pequeno porte (motores com potência menor que 100 HP) e implementos leves. Se for usada fertirrigação com vinhaça, consome-se muito mais energia pelo uso de motobombas móveis que usam energia de diesel para sua aplicação, e pelo custo energético de trazer a vinhaça até da usina para a fazenda. Mesmo por dutos de dezenas de quilômetros, precisa usar bombas com potência entre 100 HP a 200 HP funcionando 20 horas por dia (cálculo do autor baseado em dados primários de MARQUES (2009)). Se for usado caminhões para transporte da usina para fazenda, é uma atividade que consome muita energia, é mais fácil usar insumos industriais, mas aí sobra um problema ambiental de descarte da vinhaça, que é produzido na proporção de 12 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol entregue (SOUZA, 2010; NOGUEIRA, 2008).



As atividades do Grupo Manejo estão no Tabela 3-3.

**Tabela 3-3 Atividades do Grupo Manejo**

1	Aleiramento de palha
2	Cultivo tríplice operação
3	Cultivo químico (aplic. de herbicida)

**Fonte: Elaboração do autor.**

Estas atividades são executadas a cada colheita, no período de crescimento e amadurecimento da cana, seja planta, seja soca.

### 3.7.4 Grupo Colheita

Este grupo de atividades tem duas atividades: colheita propriamente dita e carregamento/transbordo, conforme listado no Tabela 3-4

**Tabela 3-4 Atividades do Grupo Colheita**

1	Colheita mecanizada
2	Carregamento e transbordo

**Fonte: Elaboração do autor.**

A colheita própria dita pode ser feita manualmente ou feita de forma mecanizada. Nesta dissertação é adotada a hipótese de que toda a colheita é mecanizada. O uso de uma colheitadeira é um grande consumidor de energia direta e indireta, para garantir uma alta produtividade e maximizar a colheita na época certa de maturação da cana. Uma colheitadeira moderna usa motores com potências normalmente na faixa de 300 HP a 360 HP (catálogo Santal 5010; catálogo John Deere CH570 e CH670), consumindo aproximadamente 60 litros de diesel por hora, trabalhando a uma velocidade de 3 a 5 km/h linear (MACEDO, 2004). Em geral, precisamos de 2 horas para processar um hectare. Uma colheitadeira tem uma massa bruta de 18 a 22 toneladas, e é um combinado (“combine”) complexo de vários implementos com alto consumo de energia e desgaste mecânico. Na colheita, primeiro as pontas são cortadas e descartadas perto da rota da colheitadeira. Equipamentos na frente do combinado alinham e deitam parcialmente as canas, permitindo que lâminas rotativas cortem o mais perto possível do solo para maximizar a tonelagem de cana colhida por hectare. A cana cortada é levado ao interior do sistema, alinhado de novo, folhas verdes são extraídas e

jogadas como componentes do palhiço deixado no solo, e a cana cortada pode ser lançado de lado como colmos inteiros ou cortado como toletes pequenos e também lançados ao solo.

Após a passagem da colheitadeira, vem a carregadeira que concentra os colmos ou toletes, se necessário precedido por um pré-alinhamento dos cilindros para otimizar o empacotamento na caçamba de carregamento, e move do solo até a caçamba de carregamento, até encher. Depois vem um trator ou caminhão para rebocar a caçamba ou uma combinação Romeu e Julieta na operação de Transbordo propriamente dito, levando a cana colhida para a área de expedição, onde é acumulado ou é despachado diretamente em veículos rodoviários de alta capacidade. Em poucas fazendas bem localizadas, entregam diretamente em terminais ferroviários.

O ajuste das lâminas de corte, tanto das pontas como na altura do solo para corte superficial, são críticos para a operação de colheita, tanto em rendimento mássico, como em rendimento de etanol final. Se cortar pouco da ponta, é enviado pedaços da planta com muito pouco açúcar no tolete mas que usa muita energia para moagem ou difusão, para desfibração, e aumenta a quantidade de folhas colhidas. Se cortar muito da ponta, perde-se trecho de colmo com alta concentração de açúcares e diminui a produtividade de tonelagem por hectare, e finalmente perde-se bagaço necessário para geração de energia e vapor. O ajuste da altura da lâmina rente ao solo também é muito crítico, pois se ficar muito afastado, diminui desgaste das lâminas mas perde tonelagem que não é extraído como biomassa útil. Se o ajuste da lâmina for muito rente ao solo, aumenta muito a fração de material mineral (da ordem de alguns porcentos) que é extraído, mas tem que ser transportado até a usina, e aumenta o gasto energético para a sua limpeza antes da extração do caldo. Além disso, ao ficar muito perto do solo no corte, também acelera muito o desgaste das lâminas de corte, o que impacta tanto no custo financeiro como na energia indireta representada pela manutenção da colheitadeira.

A afiação das lâminas é praticamente diária, e embora não use tanta energia direta, usa bastante mão de obra e trabalho de manutenção, onerando indiretamente tanto custo financeiro como energético.

Grupo Colheita é um grupo com intensidade de energia altamente significativa no cômputo geral.

### 3.7.5 Grupo Entrega

Este grupo tem uma única atividade, a entrega, normalmente rodoviária, da cana colhida, com algumas impurezas ainda, para a usina. Geralmente é feita em carretas simples ou duplas, ou em rodotrens. O objetivo é maximizar a tonelagem transportada por viagem com um veículo autopropelido (cavalo mecânico) e um motorista. A densidade da cana cortada fica na melhor das hipóteses em 400 kg/m<sup>3</sup> (CARDOSO, 2011; WIDMER, 2003), por isso usam caminhões não fechados, muito altos. Além de cavalos mecânicos com motores com potências de 300 HP a 420 HP. O maior consumo de energia direta é por causa da resistência aerodinâmica, pois o perfil é alto (limite de 4,4 metros de altura do solo), largo (largura máxima de 2,60 metros limitados por lei) e coeficiente aerodinâmico de um tijolo: 1,00. Ou pior, pois são veículos abertos, irregulares, com alta turbulência aerodinâmica em fluxo não laminar. O consumo de combustível varia conforme tipo de veículo rodoviário, variando de pouco mais que 1,0km/litro até pouco mais de 2,0km/litro. As distâncias variam de 20 km a 25 km, alguns autores usam até 10km, embora seja irrealmente baixo este valor, pois implicaria uma fazenda muito pequena (algo como 10.000 hectares). Ou são casos particulares onde a usina fica exatamente no centro de uma fazenda de 30.000 hectares. Mas aí as estradas internas são de terra, o que impede de usar os valores acima de consumo de combustível.

É necessário lembrar que os veículos voltam vazios. Alguns levam torta de filtro para o campo, mas é uma excessão. A energia direta e indireta da viagem de retorno da usina até a fazenda quase duplica a energia necessária para o transporte da cana.

A energia indireta também é muito alta, devido às grandes massas envolvidas (dezenas de toneladas para cavalo mecânico e reboques duplos) e principalmente ao alto consumo de pneus. Uma carreta simples usa 18 pneus. Um combinado duplo usa 40 pneus. A energia embutida nos pneus é de mais de 80 MJ/kg e cada pneu pesa entre 55kg a 80kg. E precisamos de pelo menos 9 a 10 jogos completos de pneus para a vida útil de um conjunto rodoviário. Apêndice A1 e A2 contém os detalhes e referências bibliográficas.

Este grupo demanda uma energia significativa, uma vez que é necessário lembrar que pelo menos 70% da massa transportada é água. Entre ATR e bagaço sêco, temos um total de aproximadamente 28% apenas. Além disso, a densidade da carga é

razoavelmente pequena, ao redor de  $400\text{kg/m}^3$  conforme relatado na Revisão Bibliográfica.

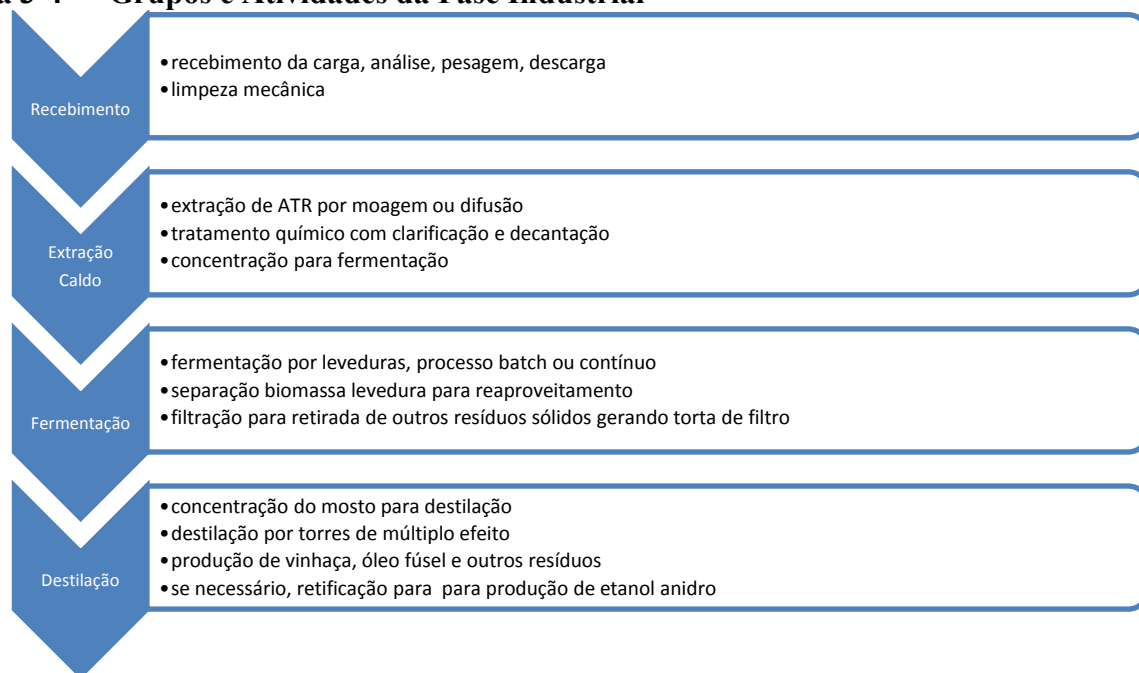
### 3.8 Detalhamento da Fase Industrial

A fase industrial, equivalente ao refino da petroquímica e ao beneficiamento do carvão mineral, transforma a biomassa em produto desejado, partindo do caldo da cana até o etanol por meio de fermentação anaeróbica com leveduras específicas.

A grande diferença no balanço energético entre EIG de cana brasileira e EIG de outras biomassas, tanto amiláceas como açucaradas, é o uso do bagaço para fornecer toda a energia operacional necessária na fase industrial. Nas outras tecnologias, os coprodutos e resíduos agrícolas não são considerados como crédito energético, tem outras aplicações para pecuária e agricultura. No Resultados, fica evidente esta grande vantagem no balanço energético, ao comparar os resultados com e sem crédito de energia do bagaço.

A fase industrial é dividida em 4 grupos: recebimento, extração do caldo, fermentação, e destilação., como ilustrado na Figura 3-4.

**Figura 3-4 Grupos e Atividades da Fase Industrial**



**Fonte: Elaboração do Autor**

A fase industrial, equivalente ao refino da petroquímica e ao beneficiamento do carvão mineral, transforma a biomassa em produto desejado, partindo do colmo da cana, passando para caldo da cana até o etanol por meio de fermentação anaeróbica com leveduras específicas.

Embora não seja estritamente parte do ciclo operacional da fase industrial de produção de E1G de cana, o grupo CoGeração é um grupo extremamente importante, fundamental para o bom balanço energético do E1G de cana-de-açúcar. Este grupo de atividades aproveita o bagaço de cana como fonte de energia, queimando-o em caldeiras, produzindo vapor superaquecido que gera energia elétrica para uso interno, vendendo excedentes de eletricidade para a rede pública, e gerando energia mecânica por meio de turbinas de vapor ou por meio de energia elétrica adicional para uma instalação com os motores eletrificados. Vapor de processo é extraído em vários pontos do circuito, com temperaturas e pressões desejadas, geralmente a baixas pressões (2,5 a 3,0 bar apenas) e com vapor saturado. Este vapor serve de fonte de calor para atividades de evaporação, destilação, e outras atividades que precisem de calor úmido.

Uma usina com as melhores práticas é totalmente auto-suficiente em energia e ainda exporta energia elétrica para a rede pública. A fração exportada depende da otimização dos equipamentos internos, e das características do sistema de cogeração instalado. Geralmente a potência instalada, com equipamentos de última geração, é da ordem de dezenas de MW, com caldeiras de 90 bar e 540°C.

Grupo Recebimento tem as atividades de recebimento da carga de cana, amostragem para estimativa de ATR e portanto do preço a ser pago ao fornecedor (tanto próprio como externo independente), descarga na área de limpeza, limpeza e movimentação para a área de alimentação de moagem/difusão.

Grupo Extração de Caldo recebe colmos ou toletes já limpos, extrai o caldo por moagem mecânica ou por processos de difusão com água. O processo de moagem é mais tradicional, usa bastante energia mecânica, mas gera um bagaço com umidade próxima de 50% ou até algo abaixo. Difusão extrai mais ATR da cana, usa menos energia, mas deixa o bagaço com mais umidade e diminui rendimento da queima do bagaço na caldeira. Cada caso é um caso diferente, depende do cultivar e até do clima antes da colheita, para melhorar rendimento de moagem ou de difusão.

Antes da moagem, a cana geralmente é picada para facilitar homogeneização na esteira de alimentação, e passa por desfibradores com lâminas que procuram quebrar as fibras e expor as células vegetais para máxima extração. A moagem é feito em vários

grupos de moendas, cada um com 3 a 4 rolos. O bagaço vai passando de um conjunto para o próximo, e nos finais, é usado água de embebição para extrair o máximo possível de açúcares.

O caldo extraído passa por um tratamento químico de clarificação com vários insumos industrializados em tanques agitados, seguidos de polímeros floculantes e decantação final. A filtração gera as tortas de filtro que podem ser usados como coadjuvantes de adubação. O caldo extraído, agora limpo e contendo basicamente ATR, ainda passa por aquecimento a vapor para concentrar o caldo e melhorar o rendimento nas dornas de fermentação.

Grupo Fermentação recebe o caldo semi-concentrado e usa leveduras específicas em fermentação anaeróbica, onde sacarose é usado como substrato em bioreator, servindo de fonte de alimentos para os microrganismos. Como produto final, temos não só etanol, em concentrações ao redor de 11%, como também pequenas frações de outros produtos orgânicos resultados do metabolismo das leveduras. É claro, produção de alguma biomassa extra na forma de mais levedura. A saída da Fermentação é uma mistura de caldo, etanol, subprodutos orgânicos, e células de levedura. Que passa por centrifugação para retirada da biomassa sólida, e a seguir concentrado de novo com calor antes de seguir para destilação. As leveduras retiradas passam por tratamento para retirar as células mais viáveis e para esterilização para minimizar contaminação com outros biopatógenos.

O caldo resultante finalmente vai para a torre de destilação, onde passa por várias torres interligados e por dezenas de pratos de destilação, gerando como resultado final etanol hidratado e muita vinhaça, em uma proporção de 10 a 15 vezes o volume de etanol produzido (SOUZA, 2010; NOGUEIRA, 2008). Vinhaça pode ser reaproveitado parcialmente para fertirrigação, mas sempre sobra vinhaça, que precisa ser tratada como resíduo com alto impacto ambiental. O uso da vinhaça também consome energia, seu uso não foi considerado neste balanço energético.

O maior consumo de energia é nas atividades de concentração de caldo e destilação, além da energia mecânica necessária para moagem e difusão para extração de ATR.

Normalmente, a queima do bagaço gera toda a energia mecânica, elétrica e calor de processo necessários para a produção industrial, mesmo nas usinas mais antigas. Nas usinas mais modernas, com caldeiras de alta pressão, como 90 bar e temperatura de 540°C, existe excedente de energia que pode ser convertida em energia elétrica e

vendida para a fornecedora local de energia elétrica. Eletrificação total dos equipamentos de extração de caldo também aumenta a eficiência global da fase industrial. Mesmo levando em conta a energia indireta dos equipamentos, prédios e químicos necessários, a fase industrial é praticamente autosuficiente.

No entanto, a contribuição da energia indireta é menor que na fase agrícola. Primeiro, a energia de movimentação de biomassa fica alocado para fase agrícola, e a entrega do etanol fica alocado para a fase de Distribuição. Além disso, a infraestrutura tem uma vida longa, medido em décadas, e baixa manutenção, ao contrário do que acontece com equipamentos agrícolas, usados em um ambiente muito mais rude e exposto ao clima e tempo ambiente.

Não foi incluído nesta dissertação a energia direta e indireta dos equipamentos de movimentação de material dentro da usina, transporte, e humanos, por falta de informações detalhadas e confiáveis.

### **3.9 Detalhamento da Fase Distribuição**

A fase de Distribuição é uma fase conhecida, com os mesmos dados primários levantados para a fase agrícola, e usa basicamente caminhões tanques com capacidades limitadas por lei por transportarem produtos considerados perigosos. Geralmente são veículos com capacidade para 15.000 litros, 30.000 litros, ou dois tanques de 30.000 litros acoplados um único cavalo mecânico com tração 6x4.

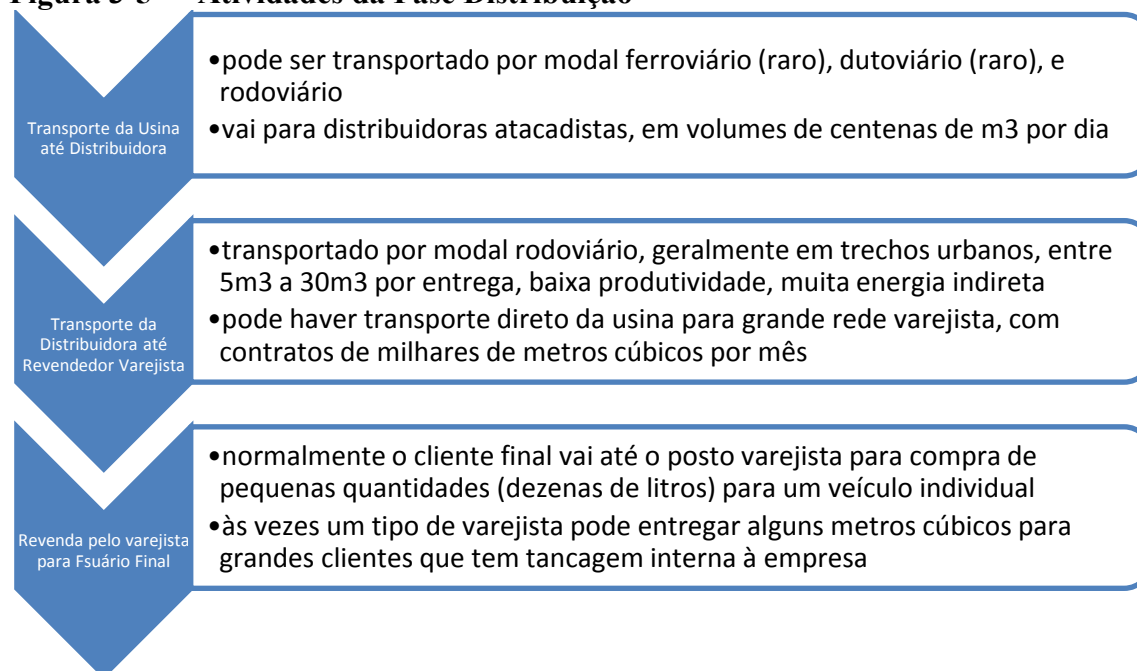
As distâncias médias das usinas para distribuidoras urbanas é de 268,35 km e as distâncias médias da distribuidora para o posto é de 68,93 km (GAMA, 2014). A intensidade de energia<sup>1</sup> em litros/(m<sup>3</sup>.km) é menor na atividade de distribuição no atacado (uso de carretas simples e duplas para média distância) que na distribuição urbana (uso de caminhões truck com capacidade de 15.000 litros em grandes centros e caminhões de 25.000 a 30.000 litros para grandes postos de estrada e grandes avenidas). O custo energético é quase igual ao custo energético de movimentação de insumos agrícolas. E a intensidade de energia é quase o dobro do necessário para entregar óleo diesel, porque não só o volume é 67% maior, como a vida útil de cada veículo é menor por causa do aumento do número de viagens para a entrega da mesma quantidade de MJ

---

<sup>1</sup> Intensidade de energia medida em litros de diesel por metro cúbico de carga transportada por quilômetro rodado pelo veículo de carga

de combustível para o posto de combustíveis. A sequência de atividades para esta Fase de Distribuição está ilustrada na Figura 3-5

**Figura 3-5 Atividades da Fase Distribuição**



**Fonte: Elaboração do autor.**

### 3.10 Metodologia de cálculo da energia total

Todo o ciclo produtivo é dividido em Fases, cada Fase é dividido em Grupos de Atividades. Cada Atividade tem um Vetor Energia com 9 componentes. Cada componente é calculado com metodologia própria. A soma das energias de cada componente do vetor resulta na energia total usada pela Atividade.

A soma das energias das Atividades de um Grupo resulta na energia demandada pelo Grupo. A soma das energias de todos os Grupos de uma Fase resulta na energia demandada pela Fase.

As atividades foram modeladas na medida do possível segundo as atividades relatadas em MACEDO (2004), tanto na Fase Agrícola como na Fase Industrial. As atividades da Fase Distribuição são novas e contém apenas duas atividades em um único Grupo.

Atividades e Grupos que são executadas uma vez a cada ciclo tem seus valores de energia divididos pelo número de colheitas do ciclo. Lembrando que temos um ciclo de 6 anos com 5 colheitas no ciclo.



O balanço final inclui a eletricidade excedente da cogeração. Não inclui energia do palhiço, nem da torta de filtro, nem da vinhaça. Não foram encontrados dados confiáveis e consistentes sobre enfardamento e transporte de palhiço, nem dados sobre a eficiência do uso do palhiço em caldeiras projetadas para queima de bagaço de composição relativamente uniforme. Uso de vinhaça e torta de filtro não é padronizado, pode depender de restrições ambientais, e por estas incertezas, não foram incluídos no balanço energético. A sua inclusão certamente melhora EROI final, não só pelos nutrientes, mas principalmente por evitar o uso de insumos agrícolas que vem de longa distância.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal resultado obtido é o EROI geral de 1,67 para E1G obtido a partir de cana-de-açúcar em ambiente brasileiro. Os resultados intermediários obtidos, na forma de uma lista de vetores energéticos, são as energias necessárias para cada atividade, cada Grupo, e cada Fase do ciclo produtivo completo do E1G de cana-de-açúcar. O indicador EROI mede a sustentabilidade energética, embora não seja o único indicador. É necessário estimar a sustentabilidade ambiental pela demanda de vários recursos como terra, adubos, corretivos agrícolas, infraestrutura industrial e de distribuição.

Como foi apresentado, o ciclo produtivo do etanol vai da fazenda até a entrega do produto no posto de combustível. O ciclo inteiro se divide em 3 fases com missões bem distintas e portanto possível de fechar um volume de controle sem realimentações de massa e energia entre elas, facilitando conceitualmente o relacionamento entre atividades e energia transferida. As três fases são a Agrícola (que produz biomassa usando insumos, maquinaria industrial e energia solar), Industrial (transformação da biomassa em E1G) e Distribuição (leva o produto ao consumidor final).

Todas as intensidades de energia foram calculadas em quatro indicadores: MJ/ha, MJ/ton, MJ/litro, MJ/MJ, usando os dados de produtividade média brasileira segundo CONAB (2016a): 76,9 toneladas de cana por hectare, 76,3 litros de etanol por tonelada de cana, resultando em uma produtividade líquida de 5.867,5 litros/hectare de etanol hidratado. Foi assumido que sem combustível fóssil, não tem sentido a produção de etanol anidro para mistura na gasolina automotiva.

MJ/ha e MJ/ton refletem o esforço agrícola. Portanto, é afetado por fatores ambientais como clima, variedade de cultivar usado e tipo de solo. MJ/litro refletem o quanto da energia útil é usado para a sua produção. MJ/MJ reflete EROI e a eficiência energética total da cadeia produtiva.

O indicador EROI final resultou em 1,67 ou seja, para cada MJ de energia direta e indireta aplicada na produção de E1G de cana-de-açúcar, temos entregue ao consumidor 1,67MJ de energia na forma de etanol hidratado. Foi assumido que todos os agentes econômicos e operacionais estão usando as melhores práticas, com uso sempre de veículos pesados para carga, mecanização total da agricultura, equipamentos de última geração na área industrial, e otimização da distribuição com veículos de 45.000 litros e 15.000 litros. Não foram incluídos a energia direta e indireta de movimentação

de insumos e adubos por distâncias transcontinentais (10.000 a 15.000 quilômetros vindo do Canadá e Rússia). Também não foram incluídos a energia direta e indireta de operação de portos e e outros entrepostos intermodais. Também não foram incluídos a energia indireta de estrutura industrial de produção de insumos agrícolas como extração de gás natural e movimentação até a planta de amônia e uréia, energia indireta de máquinas pesadas usadas em mineração de calcáreo, na desidratação de gipsita. Não foram encontrados dados confiáveis para estas energias. Com a inclusão de todos estes fatores, EROI tende a ter um desempenho pior, abaixo de 1,67.

Por outro lado, não foram incluídos a energia do palhiço de cana (folhas mais pontas da colheita), que provavelmente tem um balanço energético positivo, mas não tem estudos suficientes para energia total de enleiramento, enfardamento, empacotamento com alta densidade, transporte até a usina, e efeitos desta mistura heterogênea em caldeiras otimizadas para um combustível relativamente homogênea como bagaço de cana limpa.

Também não foram incluídos a economia de energia dos insumos, quando aplicados na medida do possível, torta de filtro e vinhaça no campo. A reciclagem dos nutrientes P e K destas duas fontes podem economizar energia suficiente de insumos para compensar a energia de reciclagem industrial dos resíduos da usina.

Outro fator a ser ponderado é que não foi estudado nenhuma alternativa para produção de elementos químicos atualmente supridos como subprodutos da indústria petroquímica, como o hidrogênio necessário para produção de nitrogenados a partir do hidrogênio do gás natural. Sem petróleo e gás natural a longo prazo, mais E1G, ou outra biomassa terá que ser produzida e usada para gerar hidrogênio necessário para os adubos nitrogenados. A Tabela 4-1 resume os dados sumários por fase e os indicadores macros.

**Tabela 4-1 Resultados Balanço Energético E1G**

Componente	Valor	Observações
Fase Agrícola	69.955 (MJ/ha)	Energia total para produção de biomassa, além da energia solar.
Fase Industrial	4.265 (MJ/ha)	Energia indireta de prédios, maquinarias e insumos químicos para pré-tratamento do caldo
Fase Distribuição	2.761 (MJ/ha)	Energia direta e indireta de veículos de carga
Excedente Eletricidade	-3.404 (MJ/ha)	Energia elétrica excedente exportada para a rede
Balanço Total	73.577 (MJ/ha)	Energia líquida usada para entrega do E1G já com crédito de eletricidade excedente
Energia E1G	123.069 (MJ/ha)	Energia de E1G por hectare com produtividade CONAB (2016a) em MJ equivalentes de etanol hidratado produzidos em um hectare
EROI	1,67	Indicador de sustentabilidade energética, este indicador é adimensional

**Fonte: Elaboração do autor**

A energia usada com valor 4.265MJ/ha na Fase Industrial é devido à energia indireta de edifícios, maquinarias, produtos químicos industriais e manutenção da usina. A energia com valor 2.761MJ/ha na Fase Distribuição é devido à energia direta e indireta de transportar etanol da usina para distribuidora e da movimentação da distribuidora para o posto de combustível. A energia excedente disponível com valor 3.404MJ/ha é eletricidade produzida na cogeração, como energia líquida junto com etanol produzido. Note que esta eletricidade excedente é calculado, não é medido experimentalmente, e seu valor é compatível com a média relatada na literatura em kWh, convertido em MJ.

EROI com valor 1,67 comprova que efetivamente E1G de cana é um biocombustível líquido que é termodinamicamente sustentável, isto é, mesmo sem energia fóssil, 40% de todo E1G produzido é energia útil, o resto é usado para produção e manutenção de toda a infraestrutura de plantação e industrialização da cana.

Esse EROI com valor 1,67 só é possível com a entrada de energia solar direta, na ordem de  $2,07 \times 10^9$  MJ/ha/colheita. O aproveitamento da energia solar é bem baixa, da ordem de 0,4%. Também é de notar a perda por erosão de cerca de 12 toneladas por ano (0,4mm/ano). A energia (energia) estimado para produzir esta quantidade de solo por intemperismo, é da ordem de  $2,48 \times 10^{10}$  MJ/ha (ZUURBIER, 2008; COHEN, 2005; ODUM, 2000), bem maior que a energia solar. O que é explicável, pois a radiação solar direta é relativo a um ano apenas. Por outro lado, leva-se séculos a milênios para

formação de solo com a granulometria adequada, devido a intemperismo, ação de microrganismos, ataque de ácidos e bases inorgânicas. Uma vez esgotado este solo fertilizável, o uso de adubos não restaura a sua fertilidade, pois cana-de-açúcar precisa de solo argilo a siltoso para seu desenvolvimento. A questão do fim da terra viável para agricultura é problema para daqui a alguns séculos, talvez milênios. Mas um século passa rápido para a implementação em larga escala de uma mudança tão fundamental como agricultura em áreas grandes e fixas.

Fica a ressalva final que esta dissertação, apesar de ter como um dos pilares a ampliação da fronteira do sistema e confiabilidade dos dados primários, contém ligeira subestimação de energia necessária para a produção de E1G na cadeia toda. Algumas energias, atividades e parâmetros foram omitidas não por não serem necessárias, mas porque não foi possível obter algum dado confiável para ser uma contribuição cientificamente correta. O Quadro 4-1 relata algumas das variáveis omitidas.

**Quadro 4-1 Atividades e Variáveis omitidas no modelo**

Influência geográfica	São muitas as variáveis que influenciam a produtividade agrônômica, entre elas a orografia, pois pode limitar a mecanização total da atividade agrícola. Rampas com ângulo acima de 6% modificam muito a produtividade de tratores e colheitadeiras, além de modificar o rendimento dos nutrientes e insumos como calcário e gesso agrícola
Granulometria	Granulometria do terreno influencia disponibilidade de nutrientes. Cana é altamente produtiva em terrenos em solo argiloso-siltoso. Em terrenos siltoso-arenoso a produtividade é baixa, aparentemente por causa da lixiviação dos nutrientes por causa da alta porosidade, como da perda atmosférica de nitrogenados. Dentro do Brasil, a produtividade do sudeste é o dobro de regiões do nordeste e norte. Fonte CONAB (2016a).
Insumos importados	Não foi estimado e nem incluso a energia necessária para trazer insumos minerais do exterior. Importações maciças de nutrientes, principalmente P e K, vem de regiões como Canadá, Rússia e Oriente Médio. Além da distância marítima de milhares de quilômetros, não foram encontrados dados médios confiáveis sobre os modais internos de cada país exportador, até o porto de exportação. Além disso, não foi conseguido levantar dados confiáveis sobre energia indireta contida em navios de grande porte, para poder estimar a energia total necessária por tonelada de minério ou adubo semi-processado vindo de navio. Como a premissa básica é que a longo prazo não vai haver energia barata para importação maciça de insumos agrícolas, a eliminação desta parcela de energia não influencia significativamente as análises de sustentabilidade absoluta, mas certamente influencia no EROI calculado para a situação energética de 2016.

<p>Infraestrutura agrícola</p>	<p>Não foi feita a estimativa da energia indireta para manter uma infraestrutura agrícola altamente mecanizada. Qualquer fazenda de médio a grande porte, com 30.000 a 100.000 hectares, funciona como uma grande empresa, com uma complexa estrutura organizacional, logística e suporte operacional e administrativo. Não foram encontrados dados confiáveis sobre dimensionamento e custeio desta estrutura, nem houve tempo para pesquisas no campo, nem dados divulgados pelo IBGE ou Ministério da Agricultura. Lembrando alguns itens relevantes, temos frota de veículos pequenos para transporte de pessoas e pequenas ferramentas para manutenção e administração. As frotas de onibus para transporte de trabalhadores rurais e infraestrutura de alimentação para o trabalhador rural não foram incluídas. As oficinas para manutenção local com área ocupada, metais, uso de energia, ferramentas, pessoal não dimensionado, veículos leves de suporte, também não foram contabilizados. Também foi excluído a energia total de toda uma infraestrutura administrativa com pessoas, computadores, prédios, e certamente, muito ar condicionado pois as áreas propícias à cana também são regiões com verão intenso e alta radiação solar. Também foi ignorado toda a manutenção de caminhos internos, cercas da propriedade, inspeções, manutenção de áreas ambientalmente protegidas. Em suma, temos um custo fixo energético sobre o qual não foi levantado dados detalhados, mas certamente usa energia para a sua produção e manutenção.</p>
<p>Infraestrutura industrial</p>	<p>Nesta dissertação, foi usado um modelo de longo prazo, onde foi assumido a hipótese que todas as usinas usam a tecnologia mais eficiente possível. Também não foi estimado custo energético da infraestrutura além de prédios, tais como frota de veículos suporte da usina, veículos pesados como caminhões para movimentação interna de biomassa e resíduos, e principalmente veículos carregadores e manipuladores de bagaço depois da extração do caldo por moagem ou difusão. Também não foi levantado a energia necessária para refeitórios e alimentação interna, e esforços administrativos e comunicação de dados. Simplesmente não tem informações confiáveis para tal avaliação.</p>

<p>Infraestrutura Distribuição</p>	<p>Só foi incluído a energia aproximada usada pela frota de caminhões. No entanto, o setor de distribuição é um setor complexo, com a cadeia começando pelo estoque da usina, estrutura de carregamento (aço inox para suportar a corrosividade do E1G), plataformas, pessoal, muitas bombas elétrica de alta potência. Além da frota de veículos, o combustível vai para uma Base de Distribuição, que recebe no atacado e vende no atacado para os postos de combustível. Estas Bases tem uma estrutura de armazenamento e logística muito maior que de uma grande usina. O armazenamento geralmente é de dezenas de milhões de litros, enormes pátios de manobra, dezenas de plataformas para carregamento de caminhões, bombas elétricas de alta capacidade (&gt; 100HP), infraestrutura de dutos de alta capacidade com capacidade de suportar corrosão de E1G, inúmeras válvulas especiais para roteamento de dutos entre tanques e bicos de abastecimento, muitas pessoas para operação, e uma infraestrutura específica de dutos, bombas e equipamentos de alta pressão contra incêndio, exigidos por lei, além de geradores de emergência. E pessoal administrativo e seus prédios e refeitórios, além da frota de carros pequenos para suporte administrativo.</p>
<p>Serviços econômicos</p>	<p>Não foi feito um levantamento de energia embutida em serviços que vem da sociedade econômica em geral, com fornecimentos de serviços financeiros, administrativos, burocráticos, científicos, órgãos governamentais de fomento e apoio específicos ao setor energético. Enfim, tudo que for específico para o funcionamento do sistema E1G. Ou de qualquer forma de energia. Esta energia indireta é muito difícil de estimar, pois não temos estatísticas corretas e oficiais para estabelecer a cadeia de alocações energéticas e financeiras. Brasil não é notado pela excelência estatística de seus dados operacionais internos. Serviços especializados externos, como análise de solo, levantamentos topográficos, comunicação de dados, contabilidade, nada disso foi incluído, provavelmente não são relevantes no contexto, mas existem e consomem energia</p>

**Fonte: Elaboração do Autor**

Por outro lado, outros fatores ajudaram a subestimar o EROI calculado. Tem muitas oportunidades de otimização no uso de energia direta e indireta no ciclo completo. O Quadro 4-2 mostra os principais pontos que podem ser usados para melhorar EROI de E1G.

**Quadro 4-2 Fatores que podem melhorar EROI**

Insumos intra fazenda	Um grande contribuinte de demanda energética é o uso de insumos agrícolas, como corretivos e nutrientes. Feito um esforço de reciclagem dos macronutrientes, já é possível economizar não só a energia de produção dos nutrientes, mas também a energia de transporte dos adubos. Processos devem ser desenvolvidos para aproveitamento integral de torta de filtro e vinhaça e cinzas de cogeração.
Eólica intra fazenda	Aproveitamento de fração da fazenda para instalação de energia eólica. O espaçamento entre geradores eólicos é da ordem de 150 metros, ocupando pouca área na superfície. Estudos precisam avaliar a influência de retirada de energia em larga escala no microclima da fazenda e sua influência na produtividade de biomassa
Compartilhamento infraestrutura rural	Concentração de fazendas em regiões vizinhas, compartilhamento de estruturas como armazenamento de vinhaça e torta de filtro, adubos e corretivos, e transporte de massa para cana produzida.
Compartilhamento infraestrutura industrial	Concentração de armazenamento de E1G produzido em tancagem comum a mais de uma usina. Permite uso de dutos para carregamento ferroviário ou direto para distribuidoras regionais. Este compartilhamento diminui muito a energia da Fase Distribuição

**Fonte: Elaboração do Autor**

#### 4.1 Fase Agrícola

A fase agrícola é a fase de produção da biomassa a partir de energia solar e muito insumo industrial aplicado no campo, usando mecanização em larga escala, produzindo cana com alto rendimento tanto em tonelagem como em ATR que resulta em boa produtividade industrial, dentro de um período curto de tempo.

Esta fase incorpora grande quantidade de energia, tanto direta, na forma de combustível líquido, como indireta, na forma de produtos manufaturados, infraestrutura, recursos humanos e serviços ambientais. Os recursos humanos, apesar de estarem previstos, não foram calculados porque os valores finais afetam pouco o resultado final. Por outro lado, os serviços ambientais incorporam tanta energia solar, ao redor de 2 a 3 ordens de grandeza acima das energias finais, que a sua incorporação mascara os detalhes e prejudica os estudos de sensibilidade às variáveis de entrada.



É nesta fase que se captura toda a energia solar que possibilita uma energia razoavelmente renovável. A relação entre a energia solar que chega e a energia líquida do EIG produzido por hectare, chega a 456 vezes.

Fase agrícola tem uma peculiaridade temporal e operacional. O ciclo produtivo é de seis anos, com cinco colheitas anuais. O ciclo completo tem uma reforma total do canavial, um período de crescimento e maturação, uma colheita da cana planta, e mais quatro colheitas de cana soca. Cana-de-açúcar é uma planta perene, após uma colheita, volta a crescer mais colmos e pontas, pois a massa radicular continua viva e ativa. No entanto, a produtividade muda, e normalmente vai se reduzindo. De um modo geral, após a quinta ou sexta colheita, a produtividade em tonelagem e ATR cai tanto que é mais compensador financeiramente, reformar o terreno e começar novo ciclo produtivo. Na prática, é quase padrão um ciclo de 6 anos para um ciclo completo, uma primeira plantação de 1,5 anos, e a partir daí 5 colheitas, e finalmente meio ano de descanso da terra ou uso para safrinhas complementares. Este ciclo prático é que é adotado nesta dissertação.

A fase agrícola é subdividido em vários grupos de atividades, cada grupo com um objetivo da etapa. Alguns grupos são executados uma vez por ciclo, outros são executados anualmente a cada colheita. A energia destes grupos e atividades é dividido pelo número de colheitas (5 colheitas) e alocado a cada colheita. Outros grupos de atividades são relacionados somente à safra corrente e a sua energia é alocado diretamente à produção.

Os dados levantados são muito variáveis, como toda atividade agrícola. Resultados finais são afetados por variáveis como clima, tempo local, pluviosidade, manejo, solo, qualidade dos nutrientes, técnicas de aplicação de insumos, irrigação complementar, cultivar usado no ciclo, pragas de insetos e microrganismos, plantas invasoras. Enfim, atividade agrícola é uma atividade de risco, onde planejamento e tecnologia andam lado a lado com a sorte individual. Por isso, os dados levantados e relatados nesta dissertação, devem ser usados com cautela, e não podem ser extrapolados para outros países sem a devida estimativa de correções necessárias tanto naturais (terreno, clima, distâncias) como de tecnologia (insumos agrícolas, mecanização tecnológica). Sequer podem ser aplicados indiscriminadamente em diversas regiões deste Brasil de extensão continental. Lembrando que a produtividade do sudeste é praticamente o dobro do norte e nordeste, este estudo resulta em médias

nacionais. Mesmo a energia usada em cada atividade ou grupo é sujeito a regionalização e economias de escala.

Um resumo das energias de grupos de atividades da Fase Agrícola é mostrado na Tabela 4-2. Os dados numéricos são expressos em MJ/ha, rateados por colheita quando o grupo é executado uma vez por ciclo.

**Tabela 4-2 Consumo Energia por Grupo de atividades na Fase Agrícola**

Atividade	Valor (MJ/ha)	Observação
Preparação Terreno	5.268	Atividades de preparação mecânica do terreno, preparação química, abertura de sulcos para plantio. Inclui energia de movimentação dos insumos agrícolas até a fazenda
Plantio	49.687	Colocação das mudas, cobertura de terra, primeiros tratos culturais incluindo adubação e correção de solo inicial
Manejo	2.087	Tratos culturais por colheita
Colheita	6.609	Uso de colheitadeiras combinadas, com alta potência e grande massa, concomitante com uso de transbordo
Entrega	6.303	Transporte da cana até a usina, distância média 25km, rodoviário, baixa densidade (< 500kg/m <sup>3</sup> ), usando bitrem para maximizar eficiência energética

**Fonte: Elaboração do Autor**

A energia alocada ao grupo Plantio é muito maior que os outros valores. Considerando o crédito de energia do uso do bagaço, esta Fase usou 90,87% de toda a necessidade líquida de energia sem o crédito de eletricidade excedente. É necessário lembrar que nesta Fase foi produzida também o bagaço de cana, que contém 40,26% de toda a energia necessária para a cadeia produtiva (cálculos do autor).

Foi alocado toda a energia de insumos agrícolas e principalmente, toda a energia usada para movimentação destes insumos desde a fonte primária, até a fazenda usuária. As distâncias médias da distribuidora, mesmo quando a produção é local, é de centenas de quilômetros. Quando é importado, a distância é de dez mil a quinze mil quilômetros, embora a energia da importação de insumos agrícolas não tenha sido contabilizado. Por falta de dados confiáveis para energia indireta para esta etapa de importação, a energia de movimentação internacional foi omitida, gerando resultados de demanda energética subestimados. E sem energia fóssil, provavelmente não haverá importação.

Para melhor compreensão da composição, cada grupo é desmembrado em atividades com sua energia usada, na Tabela 4-3 a seguir

**Tabela 4-3 Energia usada por atividade agrícola. (MJ/ha)**

Grupo	Descrição Atividade	Valor
PrepTerreno	Aplicação de calcário	1.356,72
	Aplicação de gesso agrícola	2.303,43
	Eliminação mecânica soqueira	381,39
	Eliminação química de soqueira	44,32
	Gradagem pesada	213,95
	Subsolagem 3	266,80
	Gradagem pesada II	206,00
	Gradagem pesada III	206,00
	Gradagem de acabamento	118,04
	Sulcação	171,66
Plantio	Adubação N	39.474,99
	Adubação P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7.719,09
	Adubação K <sub>2</sub> O	1.511,36
	Distribuição de mudas	579,57
	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	250,34
	Cultivo químico (aplicação de herbicida)	44,32
	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	107,02
Manejo	Aleiramento de palha	369,47
	Cultivo triplice operação	1.496,12
	Cultivo químico (aplicação de herbicida)	221,61
Colheita	Colheita mecanizada	3.100,77
	Carregamento e transbordo	3.508,48
Entrega	Entrega para usina	6.303,11

**Fonte: Elaboração do autor**

Relevante notar que as maiores contribuições são as atividades que envolvem a aplicação de insumos agrícolas (corretivos calcário e gesso agrícola, adubos NPK). A grande contribuição é o transporte de insumos agrícolas (grandes massas, baixo valor agregado) como calcário, gesso agrícola, adubos formulados, vem de longa distância. Em geral as empresas produtoras ficam perto das minas (MG, BA). Como a rede ferroviária brasileira é muito restrita, o modal predominante é o rodoviário. A distância média adotada foi de 500km, estimativa do autor usando dados de localização física dos maiores produtores, e como destino o centro do estado de São Paulo, onde fica a maioria das fazendas. Esta estimativa é corroborada por SOARES (2009), SILVA (2013) e GARCIA (2011). As distâncias das fazendas do centro oeste, norte e nordeste são ainda maiores. admitindo que regiões norte e nordeste importam os insumos por navio, com energia indireta equivalente. Sem energia fóssil, a movimentação de

insumos agrícolas é aumentada para região norte e nordeste, pois as minhas ficam no centro e sudeste brasileiro.

A energia indireta embutido em equipamentos agrícolas, como tratores, implementos e caminhões, é uma contribuição relevante. Em atividades agrícolas a vida útil dos equipamentos é relativamente curto. Tratores duram uns 5 anos, implementos duram uns 8 anos, caminhões em uso rodoviário asfaltado, duram uns 800.000 quilômetros, mas usam entre 8 a 10 jogos completos de pneus, cada um pesando de 55kg a 80kg. Se usar os caminhões dentro da fazenda, a vida útil é muito menor tanto em anos como em quilometragem. Não foi detalhado a energia de caminhões usados dentro da fazenda, para simplificação dos cálculos, foi assumido os mesmos valores de vida útil e consumo que caminhões em vias asfaltadas. Este fato subestima um pouco a energia direta e indireta total.

As atividades de colheita, transbordo e transporte também contribuem significativamente para a entrada de energia, sem serem influenciados pela energia de insumos agrícolas. A atividade de colheita usa equipamentos de grande porte, com motores de 300 HP a 400 HP, com vários implementos acoplados, com consumo horário entre 60 a 80 litros por hora de trabalho. No transporte, a maior contribuição é a energia direta do combustível, apesar de ser considerado sempre o uso de estradas pavimentadas. A densidade da carga de cana cortada é relativamente baixa, e contém cerca de 70% de água. A densidade da cana colhida é menor que 400kg/m<sup>3</sup> (CARDOSO, 2011; WIDMER, 2003), que aproveita pouco a capacidade de carga de veículos pesados, e aumenta muito a perda por arrasto aerodinâmica na estrada.

Dentro do Grupo Plantio, as atividades que mais demandaram energia foram as de aplicação dos macronutrientes NPK, principalmente pela energia indireta do nitrogenado (ver Seção 2-13 para detalhes). A aplicação em si não consome muita energia, mas a produção e transporte dos adubos precisa de muita energia. São produtos industrializados usando derivados de petróleo (nitrogenados) e mineração em larga escala (K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

## 4.2 Fase Industrial

Fase industrial é a fase que recebe a biomassa (colmos de cana), e faz todo o processo até resultar em E1G, etanol hidratado, para uso direto em veículos leves. Esta fase, em contraste com a fase agrícola, é superavitário em energia total, porque recebe mais energia na forma de bagaço que na forma de ATR.

Como toda empresa industrial, usa insumos químicos e precisa de energia. Os principais insumos são produtos químicos para pré-tratamento do caldo (clarificação) e controle microbiológico (acidificantes pós separação da levedura), além de insumos industriais como lubrificantes e fluidos. Mesmo assim, o custo energético é bem menor que na agricultura, pois estamos na fase de transformação de energia, não na fase de produção da energia.

Para simular cenário de longo prazo, assumiu-se também que a usina está usando a última tecnologia conhecida atual. Pré-lavagem com água reciclada, extração do caldo por difusão, aproveitamento integral do bagaço para co-geração, uso de caldeiras de 90 bar e 540°C com alto rendimento, eletrificação total da usina, toda energia mecânica fornecida por motores elétricos de alta eficiência conforme norma NBR 17094/Portaria 553 de 2009. Foi assumido que o vapor necessário é de 380 kg de vapor por tonelada de cana processada, enquanto a maioria das referências aceita o valor de 500 kg de vapor. A eletricidade excedente foi calculada usando eficiências de 85% para caldeira, eficiência de 80% no conjunto turbina mais geradores, co-geração com uma turbina de contrapressão e outra de condensação, sem perdas na transmissão de energia elétrica interna. Também não foi usado a energia do palhiço, onde cada hectare pode conter de 9 a 32 toneladas (MELLO, 2009), embora a maioria dos autores declaram que aproximadamente 50% do palhiço deve ser deixado no campo para fins de cobertura vegetal (BERNARDO NETO, 2009; COSTA, 2005; ROSSETTO, 2013; INNOCENTE, 2011), proteção contra erosão, proteção contra perda de nutrientes, e como complemento de adubação (INNOCENTI, 2011). Não foi feito estudo detalhado da energia necessária para o pré-processamento do palhiço, levantamento do seu perfil energético contra composição (como temos detalhados para o bagaço de cana) e condições de armazenamento. Existem poucos dados sobre enfardamento de palha ou palhiço no campo, uns poucos resultados indicam que temos densidade final do fardo pouco acima de 100kg/m<sup>3</sup> (MELLO, 2009), a produtividade de recolhimento é medido

em toneladas por hora (menos de um décimo da produtividade da cana em colmo), normalmente precisa de uma atividade de enleiramento antes do recolhimento (MELLO, 2009; RIPOLI, 2002; SPADOTTO, 2008; TORREZAN, 2003; INNOCENTE, 2011). A baixa produtividade, baixa densidade do fardo, torna o seu aproveitamento uma proposta energeticamente duvidosa. A não inclusão da energia do palhiço como crédito de coproduto no ciclo produtivo do E1G de cana-de-açúcar é justificado por falta de estudos energéticos detalhados. Provavelmente tem um balanço de energia positivo, mas talvez não seja significativo. A vida útil de cada equipamento e prédio foi levado em conta na alocação de contribuição energética. A Tabela 4-4 resume o balanço energético da Fase Industrial. Os valores são a energia líquida para cada grupo de atividades. Valor negativo implica em superávit de energia, neste caso, energia elétrica útil, disponível para exportação.

**Tabela 4-4 Resultados da Fase Industrial (MJ/ha)**

Grupo	Valor	Observação
Recebimento	3.860	Energia devido aos prédios, maquinaria
Extração caldo	406	Energia devido a insumos químicos industriais
Fermentação	0 <sup>1</sup>	Exotérmica sem dados detalhados
Destilação	0 <sup>2</sup>	Consumo de energia de vapor de processo coberto pela energia do bagaço queimado
Cogeração	-3.404	Saldo líquido em energia elétrica, disponível para exportação extra-usina

**Fonte: Elaboração do autor**

Nem sempre a máxima tonelagem de cana por hectare produz o melhor rendimento financeiro ou energético. Como exemplo, na safra 2016, segundo dados reais da CONAB, a produtividade agrícola em toneladas por hectare diminuiu, mas o rendimento em ATR aumentou, melhorando o rendimento industrial às custas do rendimento agrícola. No final o rendimento E1G/ha melhorou de 5.760litros/ha (CONAB, 2015) para algo ao redor de 5.900litros/ha (CONAB, 2016a). Ou seja, aumentou o rendimento financeiro (mais etanol por hectare) às custas de maior custo energético na fase industrial por ter que processar mais toneladas de cana por litro produzido.

<sup>1</sup> Não foram relatados por outros autores dados detalhados desta atividade

<sup>2</sup> Esta atividade está separada aqui para compatibilizar com lista de tarefas da maioria dos autores. A energia necessária está embutida nas necessidades de vapor de processo, que incluem várias atividades de aquecimento do caldo de cana e finalmente para as colunas de destilação. Na seção 4-4 na atividade 41 está detalhado a necessidade total de energia usando um valor mais provável de vapor de processo com temperatura e pressão e massa relatados.

O único grupo de atividades que vale a pena detalhar é a Cogeração. Este grupo usa o bagaço gerado durante a extração do caldo, queimando e gerando energia na forma de vapor superaquecido, gerando eletricidade para consumo interno e vapor de processo.

Usando a produtividade de 76,9 ton/ha (CONAB, 2016a), uma média de 260kg de bagaço úmido por tonelada de cana, com PCI de 7,452MJ/kg de bagaço úmido (OLIVEIRA, 2013; PERDONÁ, 2013), Deste conjunto de dados temos uma entrada teórica de energia de 150.794MJ/ha na forma de bagaço. Adotando a eficiência de 85% para a caldeira de alta pressão (PERDONÁ, 2013) temos uma energia líquida na saída da caldeira de 128.176MJ/ha. Usando a necessidade de energia de 353kWh/ton cana processada, conforme ZAMPIERI (2005), temos uma necessidade de 97.448MJ/ha em vapor de processo. Adotando o valor de 16,24MJ/ton cana como necessidade de energia mecânica na usina (MACEDO, 2004), usando o fator de eficiência teórica global para conversão de energia térmica em energia elétrica de 0,57, e usando o fator de eficiência de motores elétricos de grande porte, dentro das normas ABNT de eficiência energética, chega-se a uma demanda de 14.015MJ/ha de energia mecânica. Usando o valor da necessidade de 12,90 MJ/ton cana (MACEDO, 2004) e os mesmos parâmetros da energia mecânica, exceto o fator de eficiência dos motores, chega-se a uma demanda de 10.741MJ/ha para a demanda de energia elétrica. A energia termodinâmica remanescente, convertido em energia elétrica, resulta em um excedente de 3.404MJ/ha... O resultado de 3.404MJ/ha equivale a 12,30kWh/ton cana processada, usando a produtividade de 76,9ton/ha (CONAB, 2016a). Esta energia é eletricidade já produzida, levando em contas todas as perdas termodinâmicas da cadeia caldeira+turbina+gerador.

### **4.3 Fase Distribuição**

A fase de distribuição tem duas atividades: a movimentação do produto da usina até uma distribuidora e a movimentação da distribuidora até o posto de combustível. Para máxima eficiência energética, é adotado o transporte da usina até a distribuidora sempre em veículos de carga bitrem, composto de um cavalo trucado tracionando dois semi-reboques, com capacidade total de 45.000 litros de E1G. A distância média entre uma usina e uma distribuidora é de 268,35km (GAMA, 2014), em um veículo de carga

com uma intensidade de energia de 4,14MJ/km rodado (só energia indireta de metal e manutenção, ver Apêndices para detalhes) mais a energia direta de combustível, resultando em 1.669MJ/ha de energia necessária. A distância média entre distribuidora e posto de combustível é de 68,93km (GAMA, 2014), sendo o transporte feito normalmente em caminhões trucados com 15.000 litros apenas (tráfego urbano em cidades), resultando em 1.093MJ/ha. Apesar da disparidade de distâncias, a eficiência de energia em transporte é bem menor ao usar o veículo de menor capacidade para entregas urbanas.

Não foi considerado a energia dos tanques de armazenamento tanto da distribuidora como dos postos de combustível. Tipicamente uma distribuidora tem armazenamento médio de 30 a 50 milhões de litros de um tipo de combustível, enquanto um posto de combustível tem capacidades muito variáveis, variando de 15.000 litros até mais de 150.000 litros para um determinado combustível. A energia desta infraestrutura, assim com a energia indireta da infraestrutura de dutos e bombeamento, a energia direta necessária, e energia de manutenção, não foram computadas nesta dissertação.

A energia para a Fase Distribuição é semelhante à energia total necessária para o transporte da cana da fazenda até a usina. As principais explicações estão no Quadro 4-3

**Quadro 4-3 Diferenças entre Transporte Cana e Distribuição Etanol**

Motivo	Detalhamento
Densidade da Carga	No transporte da cana colhida, a massa específica é da ordem de 400kg/m <sup>3</sup> , enquanto no transporte de etanol, é da ordem de 790kg/m <sup>3</sup>
Densidade de Energia	No transporte da cana, apenas 30% da massa movimentada é energia (ATR e bagaço), o resto é água. No transporte do etanol, 100% é energia líquida
Economia de Escala	Em transporte rodoviário em via asfaltada e plana, o peso da carga e do veículo tem pouca influência sobre o consumo de combustível, a resistência de rolagem varia pouco. A resistência aerodinâmica é predominante em velocidades típicas de rodovias. Um bitrem leva a carga de um hectare de cana, enquanto que um bitrem de etanol líquido leva a carga de mais de 7 (sete) hectares. Além disso, para a mesma carga líquida (payload) por veículo, a resistência aerodinâmica ( $C_x^1$ vezes a área frontal) é muito maior para um veículo de carga de cana (alto, largo, quadrado, superfícies irregulares sem cobertura lisa) que um caminhão tanque (baixo, cilíndrico, liso).

**Fonte: Elaboração do Autor**

<sup>1</sup>  $C_x$  Coeficiente de Arrasto Aerodinâmica de um corpo se movendo no ar. É definido por  $C_x = \frac{2 \times F}{\rho V \times V \times A}$  onde F é a força exercida,  $\rho$  é a densidade do fluido, V é a velocidade do corpo no fluido, e A é a área frontal do corpo.



Outro fator de eficiência da Fase Distribuição é que na Distribuição, é comum usar o mesmo caminhão tanque que leva etanol em uma perna da viagem, aproveitar para levar outro combustível na perna de volta. Este dado favorável não foi levado em conta no cômputo da energia total da Fase Distribuição, para termos um EROI conservador.

#### **4.4 Análise Vetor Energia**

Como principal elemento estudado, energia é detalhado em um vetor especial para cada atividade, mantendo uma metodologia igual para todos os dados secundários, para todos os resultados parciais e finais.

De modo geral, os autores que versam sobre intensidade de energia ou balanço energético, apenas relatam um valor de energia para uma dada atividade, normalmente de maneira agregada, com pouca informação sobre os componentes usados para chegar ao valor numérico relatado. Muitas vezes o critério de acumulação muda de uma atividade para outra, sem explicitação no texto. Por exemplo, algumas atividades só contam com energia direta (combustível usado), enquanto outras incorporam a energia do transporte e vida útil do equipamento usado. Também é comum um autor usar dados secundários (resultados parciais já calculados) de outros autores, sem maiores justificativas, correndo o risco de juntar energias com componentes diferentes (or exemplo, atividade só com energia direta com outra que inclui energia indireta).

Além de tudo, muitos autores separam a energia total da atividade em seções diferentes da mesma publicação. Por exemplo, em um capítulo relata a energia fóssil usada, em outro capítulo a eletricidade usada sem discriminar a fonte primária. Para fins de balanço energético, esta prática estimula dupla contagem ou simplesmente omissão de componentes da energia.

Para minimizar esse tipo de imprecisão, a energia de uma atividade é sempre relatada como a energia total para a execução desta atividade. A energia total é composta de 9 (nove) componentes, conforme detalhado na seção 3-3 “Vetor Energia”. Nesta seção, é listado em uma tabela cada parâmetro secundário e cada resultado parcial ou total, com os 9 componentes numéricos. Se um componente de um vetor for irrelevante (pneus de implementos agrícolas) ou não confiável e portanto omitido (transporte de trator até fazenda), o valor será zerado.

Com esta matriz o leitor poderá fazer suas próprias análises, por exemplo analisando somente a contribuição de energia fóssil, a contribuição só de transporte, a influência só dos metais, etc. Ou uma combinação destes componentes. A tabela fornecida é aberta permitindo qualquer análise mono ou multivariada. Deve ser observado que os valores fornecidos são os calculados com os parâmetros publicados. Qualquer alteração dos dados primários e parâmetros pode alterar drasticamente um componente.

Os resultados de cada fase (agrícola, industrial, distribuição) só são relatados os valores da energia total de cada atividade, para permitir ao leitor uma leitura sintética e um quadro geral. Os detalhes devem ser procurados nos apêndices adequados.

A Tabela 4-5 com as energias necessárias em cada atividade mostram o valor final em MJ/ha para cada atividade. Além disso, é mostrado o valor alocado a cada tonelada de cana processada, o valor alocado a cada litro de E1G produzido, e a relação em percentual, da contribuição sobre a energia de um litro de etanol hidratado. A última coluna à direita mostra a energia acumulada necessária para a produção de um litro de etanol hidratado, acumulando a cada atividade sequencial necessária na rota produtiva, chegando a pouco mais da metade da energia útil do combustível.

Esta dissertação não teve como um dos objetivos a estimativa de emissão de CO<sub>2</sub>eq no ciclo de vida do E1G, como os estudos LCA tradicionais. O cenário base para este estudo é a longo prazo, com o esgotamento completo da energia fóssil, e a viabilidade energética e estrutural de etanol hidratado produzido a partir de cana-de-açúcar em ambiente brasileiro. Neste cenário, a menor emissão de CO<sub>2</sub>eq não é um fator determinante de escolha de energia renovável.

Sem energia fóssil, o componente CO<sub>2</sub> de todo o CO<sub>2</sub>eq emitido tem valor zero, pois todo o carbono terá que vir de carbono sequestrado da atmosfera. Outros gases equivalentes, como óxidos de nitrogênio e enxôfre, continuarão sendo emitidos por fazer parte da composição da biomassa produzida, e parte dos insumos agrícolas usados. Independentemente do balanço energético, etanol hidratado produzido a partir de cana-de-açúcar é um combustível indispensável, pois tem a característica de reciclar carbono da atmosfera.

As maiores contribuições individuais são as associadas com a produção e a movimentação física de insumos ou produtos, em qualquer das três fases. Na fase agrícola, a aplicação de corretivos e adubos responde pelas maiores contribuições, devido à longa distância para trazer os insumos até a fazenda, com grandes massas

aplicadas (centenas de quilogramas por hectare por safra). A aplicação dos insumos em si não demanda tanta energia assim. A única energia indireta embutida em um insumo que é notável são os nitrogenados, porque na sua produção usamos gás natural como fonte de hidrogênio, e usamos muita energia para produzir nitrogênio a partir do ar, além da energia necessária para a produção da amônia com o processo Haber-Bosch, que necessita de pressões ao redor de 200 bar e altas temperaturas.

Relembrando que o cenário base para este estudo é que o balanço energético implicitamente está usando energia fóssil, para poder usar dados da literatura e de tecnologias comprovadas, no cenário de longo prazo, este balanço energético certamente muda, pois novos processos terão que ser criados para produção de insumos agrícolas (como nitrogenados), lubrificantes, plásticos, e outros que são derivados da indústria petroquímica. Esta necessidade de substituir coprodutos petroquímicos vai diminuir EROI.

Outro ponto relevante a notar é que a movimentação física dos produtos (cana colhida no fim da fase agrícola, etanol produzido na fase industrial) são atividades de alta intensidade energética.

É importante notar que a energia de atividades dos grupos Preparação do terreno e Plantio, como ocorre somente uma vez por ciclo de 6 anos com 5 colheitas, já tem o seu valor dividido por 5 para alocação a cada colheita. Por isso, quando analisar o vetor energia detalhado na Tabela 4-5, nos grupos Preparação de Terreno e Plantio,.

Alguns componentes da tabela de resultados não tiveram valores alocados por não ter informação detalhada sobre intensidade de energia da atividade.

**Tabela 4-5 Resultados energia por atividade Ciclo Etanol de Cana-de-Açúcar (MJ/ha)**

Ativ <sup>1</sup>	Fase	Grupo	Atividade	EnerTot <sup>2</sup>				
				MJ/ha <sup>3</sup>	MJ/ton	MJ/L <sup>4</sup>	MJ/MJ <sup>5</sup>	Acum <sup>6</sup>
1	Agrícola <sup>7</sup>	PrepTerreno	Aplicação de calcáreo	1.357	17,64	0,23	1,10%	0,0110
2			Aplicação de gesso agrícola <sup>8</sup>	2.303	29,95	0,39	1,87%	0,0297
3			Eliminação mecânica de soqueira	381	4,96	0,06	0,31%	0,0328
4			Eliminação química de soqueira <sup>9</sup>	44	0,58	0,01	0,04%	0,0332
5			Gradagem pesada I	214	2,78	0,04	0,17%	0,0349
6			Subsolagem 3	267	3,47	0,05	0,22%	0,0371
7			Gradagem pesada II	206	2,68	0,04	0,17%	0,0388
8			Gradagem pesada III	206	2,68	0,04	0,17%	0,0405
9			Gradagem de acabamento	118	1,53	0,02	0,10%	0,0414
10			Sulcação	172	2,23	0,03	0,14%	0,0428
11		Plantio	Adubação N <sup>10</sup>	39.475	513,33	6,73	32,08%	0,3636

<sup>1</sup> Número da Atividade para ser correlacionado com o mesmo número da atividade na Tabela 4-6

<sup>2</sup> Calculado usando dados de produtividade (CONAB, 2016). Pode variar de ano a ano conforme ATR médio do ano e produtividade agrícola de biomassa

<sup>3</sup> Valores relativos aos Grupos Preparação Terreno e Plantio já foram rateados por 5 colheitas em um ciclo de 6 anos

<sup>4</sup> Indica MJ necessário para a produção de um litro de E1G hidratado

<sup>5</sup> Relação calculada adotando valor de 20,968MJ/litro de etanol hidratado com 6% de água

<sup>6</sup> Soma acumulada de fração da energia de E1G usada para a sua produção à medida que avança no ciclo produtivo

<sup>7</sup> Nomeclatura das Atividades na fase Agrícola seguem o mais fielmente possível a referência usada na Prova de Conceito (MACEDO, 2004)

<sup>8</sup> Embora alguns autores juntem as duas atividades em um único lançamento, a energia indireta de movimentação de cada insumo é significativo, obrigando o desmembramento em duas atividades. Além disso, devido ao elevado volume a ser aplicado, quase dobra a energia de aplicação, fato que nem sempre é lembrado

<sup>9</sup> Eliminação química de soqueira é relatado por poucos autores, e seu consumo de energia é baixa. A eliminação mecânica de soqueira também tem o objetivo complementar de destorramento e arejamento do solo para novo plantio

<sup>10</sup> A grande contribuição dos nitrogenados justifica a existência de uma seção inteira dedicado somente à energia de nitrogenados, com detalhamento operacional e energético da sua produção, com ênfase na uréia. A verificação da consistência do dado primário, com dados de diversos fornecedores de equipamentos para cada atividade, ajudou a chegar a um valor bem acima da média da literatura, bem perto de um autor (MENDES JÚNIOR, 2011). O uso do fator F e a movimentação do produto a longa distância por meio rodoviário explica o alto valor da energia total dos nitrogenados

12			Adução P2O5	7.719	100,38	1,32	6,27%	0,4263
13			Adução K2O	1.511	19,65	0,26	1,23%	0,4386
14			Distribuição de mudas	580	7,54	0,10	0,47%	0,4433
15			Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	250	3,26	0,04	0,20%	0,4453
16			Cultivo químico no plantio	44	0,58	0,01	0,04%	0,4457
17			Cultivo mecânico	107	1,39	0,02	0,09%	0,4465
18		Manejo	Aleiramento de palhico	369	4,80	0,06	0,30%	0,4495
19			Cultivo triplice operação	1.496	19,46	0,25	1,22%	0,4617
20			Cultivo químico (aplic. de herbicida ao longo ano)	222	2,88	0,04	0,18%	0,4635
21		Colheita	Colheita mecanizada <sup>1</sup>	3.101	40,32	0,53	2,52%	0,4887
22			Carregamento e transbordo	3.508	45,62	0,60	2,85%	0,5172
23		Entrega	Entrega para usina <sup>2</sup>	6.303	81,97	1,07	5,12%	0,5684
24	Industrial	Recebimento	recebimento da carga, análise, pesagem, descarga	3.860	50,19	0,66	3,14%	0,5998
25			limpeza mecânica					0,5998
26		Extração Caldo	extração de ATR por moagem ou difusão					0,5998
27			tratamento químico (clarificação e decantação)	406	5,28	0,07	0,33%	0,6031
28			concentração para fermentação					0,6031
29		Fermentação	fermentação por leveduras					0,6031
30			separação biomassa levedura para reaproveitamento <sup>1</sup>					0,6031

<sup>1</sup> Assumindo 100% de colheita mecanizada para máxima eficiência operacional

<sup>2</sup> Assumindo movimentação rodoviária em estradas asfaltadas entre usina e fazenda. Não foi levantado energia de transporte ferroviário de cana.

31			filtração gerando torta de filtro						0,6031
32		Destilação	concentração do mosto para destilação						0,6031
33			destilação por torres de múltiplo efeito						0,6031
34			produção de vinhaça, óleo fúsel e outros						0,6031
35			se necessário retificação para etanol anidro						0,6031
36		CoGeração	queima bagaço em caldeira <sup>2</sup>	-150.795	-1.960,92	-25,69	122,53%		0,6031
37			energia disponível <sup>3</sup>	-128.176	-1.666,78	-21,84	104,15%		0,6031
38			Gerador contrapressão						0,6031
39			Gerador de condensação						0,6031
40			Necessidade vapor processo <sup>4</sup>	97.448	1.267,20	16,60	79,18%		0,6031
41			Necessidade energia mecânica <sup>5</sup>	14.015	182,25	2,39	11,39%		0,6031
42			Necessidade energia elétrica <sup>6</sup>	10.741	139,67	1,83	8,73%		0,6031
43			Energia excedente <sup>7</sup>	-5.972	-77,66	-1,02	-4,85%		0,6031
44			Energia Elétrica excedente <sup>8</sup>	-3.404	-44,27	-0,58	-2,77%		0,5754
45	Distribuição	Distribuidora	Transporte da Usina até Distribuidora <sup>9</sup>	1.669	21,70	0,28	1,36%		0,5890
46		Revendedora	Transporte da Distribuidora até Revendedora <sup>10</sup>	1.093	14,21	0,19	0,89%		0,5978

Fonte: Elaboração do Autor

<sup>1</sup> Deveria haver Crédito de Energia pelo aproveitamento do excesso de biomassa de leveduras. Não foram encontrados dados confiáveis para este crédito

<sup>2</sup> Assumindo PCI de 16,055MJ/kg de bagaço seco (0% umidade) e 7,5420MJ/kg de bagaço úmido com 50% de umidade. Ver texto para referências bibliográficas

<sup>3</sup> Assumindo eficiência da caldeira de 85%

<sup>4</sup> Assumindo necessidade de apenas 380kg de vapor a 2,7bar saturado conforme tabela de vapor

<sup>5</sup> Adotado valor padrão de 16MJ/ton cana processada, mas totalmente eletrificada

<sup>6</sup> Adotado valor padrão de 12MJ/ton cana processada

<sup>7</sup> Energia excedente como potencial termodinâmico, não é energia disponível na prática

<sup>8</sup> Energia elétrica líquida disponível depois das perdas da turbina e do gerador e das perdas usuais de transformação de tensão e disponibilização na rede pública

<sup>9</sup> Usando equipamento rodoviário Bi-Trem de 45.000 a 60.000 litros por estradas asfaltadas distância média 268,35km, enfatizando economia de escala

<sup>10</sup> Usando equipamentos rodoviários de 15.000 a 30.000 litros, vias urbanas, distância média 68,93km

A Tabela 4-6 mostra os dados detalhados dos vetores energia de todas as atividades, grupos e fases do ciclo produtivo do etanol de primeira geração derivado de cana-de-açúcar

**Tabela 4-6 Tabela Vetor Energia com Componentes cada atividade no Ciclo de Etanol**

Ativ	EnerTot	Fossil	Ins	Trator	Impl	Rod	MovIns	Infra	Human	Ambi
	MJ/ha									
1	1.357	26,45	722	32,38	18,83	264,04	293,07		0,28	
2	2.303	26,45	1.656	32,38	18,83	270,04	299,73			
3	381	78,64	228	47,39	27,56					
4	44	11,35		20,85	12,13					
5	214	150,53		40,10	23,32					
6	267	184,36		52,12	30,32					
7	206	144,93		38,61	22,46					
8	206	144,93		38,61	22,46					
9	118	66,51		32,58	18,95					
10	172	96,72		47,39	27,56					
11	39.475	26,45	38.220	32,38	18,83	204,46	972,59			
12	7.719	26,45	7.446	32,38	18,83	92,80	103,00			
13	1.511	26,45	1.206	32,38	18,83	108,02	119,89			
14	580	47,29	395	86,87	50,53					
15	250	18,93	186	28,96	16,84					
16	44	11,35		20,85	12,13					
17	107	43,61		40,10	23,32					
18	369	94,66		173,75	101,06					
19	1.496	251,01	928	200,48	116,61					
20	222	56,73		104,25	60,64					

21	3.101	2.623,54		477,24						
22	3.508	2.771,25		530,20		207,03				
23	6.303	6.096,08				207,03				
24	3.860							3.858,29	1,39	
25										
26										
27	406		406							
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36	-150.795		-150.795							
37	-128.176		-128.176							
38										
39										
40	97.448		97.448							
41	14.015		14.015							
42	10.741		10.741							
43	-5.972		-5.972							
44	-3.404		-3.404							
45	1.669	1.378,78				289,86				
46	1.093	869,31				223,36				

Fonte: Elaboração do Autor



A Tabela 4-7 a seguir mostra a correlação entre Atividade e o Número da Atividade da Tabela 4-6

**Tabela 4-7 Correlação entre Número Atividade e Descrição Atividade**

Ativ	Grupo	Atividade	Descrição
1	Agrícola	PrepTerreno	Aplicação de calcáreo
2			Aplicação de gesso agrícola
3			Eliminação mecânica de soqueira
4			Eliminação química de soqueira
5			Gradagem pesada I
6			Subsolagem 3
7			Gradagem pesada II
8			Gradagem pesada III
9			Gradagem de acabamento
10			Sulcação
11		Plantio	Adubação N
12			Adubação P2O5
13			Adubação K2O
14			Distribuição de mudas
15			Fechamento do sulco e aplicação de inseticida
16			Cultivo químico no plantio
17			Cultivo mecânico
18		Manejo	Aleiramento de palhço
19			Cultivo tríplice operação
20			Cultivo químico (aplic. de herbicida ao longo ano)
21		Colheita	Colheita mecanizada
22			Carregamento e transbordo
23		Entrega	Entrega para usina
24	Industrial	Recebimento	recebimento da carga, análise, pesagem, descarga
25			limpeza mecânica
26		Extração Caldo	extração de ATR por moagem ou difusão
27			tratamento químico (clarificação e decantação)
28			concentração para fermentação
29		Fermentação	fermentação por leveduras
30			separação biomassa levedura para reaproveitamento
31			filtração gerando torta de filtro
32		Destilação	concentração do mosto para destilação
33			destilação por torres de múltiplo efeito
34			produção de vinhaça, óleo fúsel e outros resíduos

35			se necessário retificação para etanol anidro <sup>1</sup>
36		CoGeração <sup>2</sup>	queima bagaço em caldeira <sup>3</sup>
37			energia disponível <sup>4</sup>
38			Gerador contrapressão
39			Gerador de condensação
40			Necessidade vapor processo
41			Necessidade energia mecânica
42			Necessidade energia elétrica
43			Energia excedente
44			Energia Elétrica excedente
45	Distrib	Distribuidora	Movimentação para atacadistas de combustível
46		Revendedora	Movimentação de atacadistas para varejistas de combustível

**Fonte: Elaboração do Autor**

CoGeração justifica um Grupo inteiro, pois é fundamental para o balanço energético da Fase Industrial. Não só fornece toda a energia direta necessária para a produção industrial, como ainda fornece um excedente energético líquido na forma de eletricidade. Alguns autores relatam aqui o crédito de energia térmica da queima do bagaço, mas não na forma de energia líquida. Conceitualmente, é equivalente a relatar que a energia do etanol final em termos de energia bruta do ATR mais a energia do bagaço, sem processamento industrial

A Tabela 4-8 mostra o acumulado de energia necessária para a produção de etanol de um hectare, sem o crédito da energia do bagaço.

<sup>1</sup> Etapa incluída porque existe mercado industrial e médico para etanol anidro. Sem energia fóssil, não faz sentido a produção de etanol anidro para mistura em gasolina. Energia da produção não calculado para fins de balanço energético como combustível

<sup>2</sup> Co-Geração é o Grupo de atividades industriais que consome bagaço de cana para geração simultânea de energia térmica de processo e de eletricidade para uso interno e externo. Fundamental para o balanço energético positivo do E1G.

<sup>3</sup> Energia bruta disponível pelo PCI de queima de bagaço de cana

<sup>4</sup> Energia térmica disponível após perdas de processo na caldeira. Adotado eficiência de 85% na caldeira de 90 bar a 100 bar

**Tabela 4-8 Energia total usada para ciclo de E1G**

	MJ/ha	MJ/ton	MJ/L	MJ/MJ
Energia sem bagaço <sup>1</sup>	199.184,36	2.590,17	33,94	161,85%
Energia com bagaço <sup>2</sup>	76.981,24	1.001,06	13,12	62,55%
Excedente Eletricidade <sup>3</sup>	-3.404,28	-44,27	-0,58	-2,77%
Saldo	73.576,96	956,79	12,54	59,78%
Energia E1G <sup>4</sup>	123.069,29	1.600,38	20,97	100,00%
EROI	1,67			
NEYR	40,22%			

**Fonte: Elaboração do Autor**

A energia direta, decorrente do uso visível de energia como diesel, vapor e eletricidade, somente soma a 19.798MJ/ha, incluindo a energia da Fase Agrícola, e a energia da Fase Distribuição. A fase agrícola precisa de 69.955MJ/ha por safra, e somente 17.550MJ/ha é energia direta visível, como consumo de óleo diesel, representando apenas um quarto da energia total necessária para cumprir a fase agrícola. As maiores contribuições vem dos insumos (incluindo energia de produção e movimentação), e da energia indireta dos tratores e veículos de carga. Esta relação entre energia total e energia fóssil direta explica em grande parte porque os estudos que focam em consumo de energia fóssil e emissão de CO<sub>2</sub>eq como indicador de sustentabilidade, chegam a EROI tão otimistas.

O fato de podermos usar todo o bagaço de cana como fonte de energia é um grande diferencial na produção de E1G a partir de cana-de-açúcar, que supre toda a energia da fase industrial e ainda sobra um excedente na forma de energia elétrica renovável.

Especial cuidado deve ser exercido ao comparar EROI de E1G de cana com outros biocombustíveis, como etanol de milho americano, etanol de sorgo e biodiesel brasileiro, devido ao crédito energético pelo uso do bagaço. A queima do bagaço gera 150.795MJ/ha de energia térmica, maior que a energia líquida de 123.069MJ/ha do E1G no final da Fase Industrial.

<sup>1</sup> Energia necessária para uma safra anual, supondo que não exista bagaço de cana como fonte de energia

<sup>2</sup> Energia necessária contando com energia da queima do bagaço, notando que energia de bagaço é superior à energia líquida ao E1G produzido. Energia do bagaço é aproximadamente igual à energia bruta do ATR da cana em pé

<sup>3</sup> Energia excedente na forma de eletricidade disponível para exportação, após perdas de cogeração

<sup>4</sup> Energia de E1G como etanol hidratado, usando dados de produtividade de CONAB (2016)

A fase agrícola sem dúvida alguma, é o maior consumidor líquido de energia total, contribuindo inclusive com o fornecimento indireto da energia do bagaço para a fase industrial. Neste ponto de vista, estamos cultivando a energia para a fase industrial. Esta contabilização é que resulta no EROI favorável à cana, e ao analisarmos outros biocombustíveis, é necessário usar a mesma metodologia de crédito de energia agrícola no cômputo geral, mesmo que fisicamente esta energia cultivada não seja usada diretamente na cadeia produtiva do biocombustível.

Como a Fase Agrícola é a que consome mais energia líquida, e como contribui diretamente para a energia da Fase Industrial, é útil visualizar melhor onde estão concentrados as maiores necessidades energéticas e portanto, as maiores oportunidades de aumento de eficiência energética.

Uma análise horizontal da energia da Fase Agrícola é relatada na Tabela 4-9.

**Tabela 4-9 Análise Horizontal dos resultados Fase Agrícola**

EnerTot	Fossil	Ins	Trator	Impl	Rod	MovIns	Infra	Human	Ambi
<b>69.954</b>	<b>13.025</b>	<b>50.986</b>	<b>2.142</b>	<b>660</b>	<b>1.353</b>	<b>1.788</b>		<b>0,28</b>	
	<b>18,62%</b>	<b>72,88%</b>	<b>3,06%</b>	<b>0,94%</b>	<b>1,93%</b>	<b>2,56%</b>		<b>0,00%</b>	

**Fonte: Elaboração do Autor**

A parcela decorrente do consumo de energia direta, a energia fóssil, responde por 16,62% do total da energia. A energia indireta dos insumos agrícolas responde por uma parcela esmagadora de 72,88%. Note que este valor não inclui a movimentação dos insumos e adubos por longa distância devido à importação. O Vetor Energia mostra que os outros componentes de energia indireta como tratores, implementos, equipamentos rodoviários, movimentação de insumos, e até recursos humanos, são relativamente modestos na sua contribuição na demanda de energia.

A Tabela 4-10 mostra uma Análise Vertical da demanda de energia na Fase Agrícola, com a energia de ciclo já rateada por safra.

**Tabela 4-10 Análise Vertical Energia Fase Agrícola**

Atividade	Num Ativ <sup>1</sup>	MJ/ha <sup>2</sup>	Percentual
Aplicação de calcáreo	1	<b>1.356,72</b>	<b>1,98%</b>
Aplicação de gesso agrícola	2	<b>2.303,43</b>	<b>3,37%</b>
Eliminação mecânica de soqueira	3	<b>381,39</b>	<b>0,56%</b>
Eliminação química de soqueira	4	<b>44,32</b>	<b>0,06%</b>
Gradagem pesada I	5	<b>213,95</b>	<b>0,31%</b>
Subsolagem 3	6	<b>266,80</b>	<b>0,39%</b>
Gradagem pesada II	7	<b>206,00</b>	<b>0,30%</b>
Gradagem pesada III	8	<b>206,00</b>	<b>0,30%</b>
Gradagem de acabamento	9	<b>118,04</b>	<b>0,17%</b>
Sulcação	10	<b>171,66</b>	<b>0,25%</b>
Adubação N	11	<b>39.474,99</b>	<b>57,72%</b>
Adubação P2O5	12	<b>7.719,09</b>	<b>11,29%</b>
Adubação K2O	13	<b>1.511,36</b>	<b>2,21%</b>
Distribuição de mudas	14	<b>579,57</b>	<b>0,85%</b>
Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	15	<b>250,34</b>	<b>0,37%</b>
Cultivo químico no plantio	16	<b>44,32</b>	<b>0,06%</b>
Cultivo mecânico	17	<b>107,02</b>	<b>0,16%</b>
Aleiramento de palhicho	18	<b>369,47</b>	<b>0,54%</b>
Cultivo triplice operação	19	<b>1.496,12</b>	<b>2,19%</b>
Cultivo químico (aplic. de herbicida ao longo ano)	20	<b>221,61</b>	<b>0,32%</b>
Colheita mecanizada	21	<b>3.100,77</b>	<b>4,53%</b>
Carregamento e transbordo	22	<b>1.939,09</b>	<b>2,84%</b>
Entrega para usina	23	<b>6.303,11</b>	<b>9,22%</b>
<b>Total</b>		<b>68.385,20</b>	

**Fonte: Elaboração do Autor**

Analisando a distribuição percentil, vemos que dois grupos respondem por grandes demandas de energia: insumos agrícolas, principalmente nitrogenados, e colheita e entrega da cana.

A Tabela 4-11 mostra uma análise horizontal do grupo de atividades cobrindo os adubos agrícolas, principalmente os nitrogenados.

<sup>1</sup> Número da Atividade conforme detalhado na Tabela 4-7

<sup>2</sup> A energia das atividades referentes aos Grupos Preparação de Terreno e Plantio, que são executados somente uma vez a cada 5 colheitas, já tem a sua energia rateada por Colheita

**Tabela 4-11 Análise Horizontal atividades de adubação agrícola**

Atividade	EnerTot	Fossil	Ins	Trator	Impl	Rod	MovIns	Infr a	H u m an	A mb i
Adubação N	<b>39.475</b>	<b>26,45</b>	<b>38.220</b>	<b>32,38</b>	<b>18,83</b>	<b>204,46</b>	<b>972,59</b>			
Adubação P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>7.719</b>	<b>26,45</b>	<b>7.445</b>	<b>32,38</b>	<b>18,83</b>	<b>92,80</b>	<b>103,00</b>			
Adubação K <sub>2</sub> O	<b>1.511</b>	<b>26,45</b>	<b>1.206</b>	<b>32,38</b>	<b>18,83</b>	<b>108,02</b>	<b>119,89</b>			

**Fonte: Elaboração do Autor**

É notável a proeminência dos nitrogenados como o fator que mais contribui para a necessidade de energia. E na energia de produção. Normalmente a literatura relata que os nitrogenados são os insumos que mais demandam energia para a sua produção. Este fato justifica a necessidade de uma seção específica só para os nitrogenados, que inclua inclusive a energia do gás natural para a produção de H<sub>2</sub>, além do gás natural para produção de CO<sub>2</sub> extra. Somente uma referência (MENDES JÚNIOR, 2011) chegou a um valor aproximadamente o dobro da média da literatura (112MJ/kg de uréia). Este foi o valor adotado, embora a verificação independente, demonstrado na seção 2-14, tenha sido de 102,7MJ/kg de N disponível. A metodologia da verificação de coerência do dado primário considera que todos os processos são adiabáticos, e conta com crédito de 40% de toda a energia da queima do gás natural para obtenção do H<sub>2</sub>, como energia recuperada como energia para outros processos industriais.. Incluindo o Fator F de disponibilidade da uréia de 2,0 (VITTI, 2005; VITTI, 2009; VITTI, 2013) e temos praticamente 250MJ/kg de nitrogênio elemental necessário. em média precisamos de 86kg/ha de N elemental, portanto, precisamos de aproximadamente 360kg de uréia por hectare. Este valor é compatível com a referência principal, MACEDO (2004) estima o uso de 2.500kg de adubo para o ciclo todo, ou seja, 500kg de adubo combinado por colheita, sendo que 164kg/safra é relatado pelo mesmo autor para K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

O grupo de atividades de Colheita e Entrega da Cana é o outro grande grupo de atividades que demanda muita energia. Precisamos mover grandes massas que contém quase 70% de água. Este “volume morto” faz parte do caldo, precisa ser transportado da fazenda até a usina. E o caminhão volta vazio para a fazenda. A Tabela 4-12 mostra uma análise horizontal destes dados. A colheita mecânica também demanda muita energia pela resistência da cana ao corte com lâminas (CHANG, 1982; ALVES, 2006).

Os valores registrados são de velocidade de corte pouco acima de 4,1m/s, com tensão necessária para cisalhamento entre 15,8kgf/cm<sup>2</sup> a 28,8kg/cm<sup>2</sup>. Assumindo uma seção circular com 3cm de diâmetro, temos uma seção de área 7,069cm<sup>2</sup>, portanto precisando de uma força entre 111,68kgf a 203,58kgf. Usando uma força média de 157,6kgf atuando por uma distância de 3cm, usando 46,39J. aceitando a velocidade média de 4,1m/s a potência necessária é de 6,34kW para um único colmo. Com estes valores, é perfeitamente razoável que precisamos de um motor de 350HP a 400HP, onde se dispuser de 100HP líquido só para corte, podemos cortar menos de 100 colmos por segundo. Esta verificação de consistência do valor do dado primário valida os valores calculados para energia destas atividades.

**Tabela 4-12 Análise Horizontal do Grupo Colheita**

Atividade	EnerT ot	Fossil	I n s	Trator	Im pl	Rod	Mov Ins	Inf ra	Hu man	Am bi
Colheita mecanizada	<b>3.101</b>	<b>2.624</b>		<b>477</b>						
Carregamento e transbordo	<b>3.508</b>	<b>2.771</b>		<b>530</b>		<b>207</b>				
Entrega para usina	<b>6.303</b>	<b>6.096</b>				<b>207</b>				

**Fonte: Elaboração do Autor**

Neste grupo de atividades, a grande influência é a energia fóssil necessária. A energia indireta do trator e dos equipamentos rodoviários para transbordo (vias não asfaltadas) e transporte (vias asfaltadas) é bem inferior à energia necessária para a movimentação. A energia direta da colheita é significativa por causa da resistência mecânica para corte da cana, obrigando as colheitadeiras a usarem motores de alta potência, com 350HP a 420HP cada um, trabalhando quase sempre na sua potência máxima. Além disso uma colheitadeira é uma combinação de várias máquinas, com funções distintas. Tem que cortar pontas, cortar o colmo rente ao solo, retirar as folhas, alinhar os colmos, e expeli-los para a lateral para posterior carregamento e transbordo. A situação é agravada pela baixa densidade da cana colhida, quando empacotado no veículo de carga, menor que 400kg/m<sup>3</sup> (CARDOSO, 2011; WIDMER, 2003). Carregamento e transbordo é um conjunto de 3 operações. Um equipamento específico para carregamento alinha os colmos e toletes, pega do solo, e carrega no veículo de transbordo, procurando manter o alinhamento dos colmos e toletes, para maximizar a densidade de carregamento em kg/m<sup>3</sup> de cana. O veículo de transbordo normalmente é um veículo tipo RJ1, movimentando em distâncias médias de 20km dentro da fazenda,

em vias não asfaltadas. Mesmo assumindo otimização de todas as cargas de cana serem transportadas por bi-trem rodoviário, a energia direta é significativa, pois estamos transportando 30% de açúcar e bagaço, mais 70% de água.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 EROI Sustentável

Os resultados confirmam que o etanol hidratado produzido a partir de cana-de-açúcar em ambiente brasileiro, é viável pelo balanço de energia, com um EROI final de 1,67. O valor calculado desse indicador nessa dissertação é bem menor que o valor obtido por outros autores, conforme resumido na Tabela 2-3, onde EROI varia de 3,15 a 9,4. Uma variação notável para um mesmo tipo de estudo.

A diferença entre EROI de 1,67 e os valores da Tabela 2-3 pode ser explicada pela inclusão de energia indireta de movimentação de insumos, a extensão da fronteira até os insumos primários, pela verificação de consistência dos dados primários e principalmente pelo recálculo de todos os dados secundários. Os detalhes são descritos na seção 5-6

É necessário notar que a precisão do EROI calculado não deveria ser maior que dois dígitos significativos. Como os dados agrícolas são muito variáveis e dependem muito do clima e terreno, variações de 10% a 20% do EROI calculado pode ser considerado dentro da variação normal, mesmo sem variação de metodologia. Uma estimativa mais precisa do EROI necessita de um levantamento de dados sistemáticos por mais de um ciclo de 6 anos, com um espaço amostral que seja representativo do território brasileiro, incluindo nordeste e centro oeste.

Conforme relatado na seção 2-10, etanol brasileiro foi qualificado como “advanced bioenergy” pois foi estimado, com dados brasileiros, que consegue reduzir em 61% as emissões em relação à gasolina. Para conseguir este índice de redução de emissões, somente pode ser usado 39% da energia produzida como energia investida. Portanto o EROI mínimo necessário para obter tal índice é de 2,50, incluindo produção e transporte até o usuário final. EROI calculado neste estudo chega ao valor de 1,67 sem transporte internacional de insumos e produto final, e sem as emissões correspondentes a ILUC<sup>1</sup> segundo modelo BLUM<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> ILUC Indirect Land Use Change é um índice usado para indicar emissão adicional de CO<sub>2</sub>eq pela conversão de vegetação nativa para cultivo em agricultura industrial, como cultivo de cana-de-açúcar

<sup>2</sup> BLUM Brazilian Land Use Model um modelo matemático desenvolvido por equipe liderado por André M. Nassar do Instituto Agrolcone, com patrocínio da UNICA, (CORTEZ, 2016)

## 5.2 Maiores necessidades de Energia

Sem o crédito de energia do bagaço, é necessário 69,96GJ/ha na fase agrícola, 122,20GJ/ha na fase industrial, e 2,76 GJ/ha na fase distribuição.

Deve ser notado que o maior consumidor das 3 fases é justamente a fase industrial, que todas as referências bibliográficas relatam com excedente de energia. Sem o crédito de energia do bagaço de cana, E1G de cana-de-açúcar é uma energia não sustentável. Contando com o crédito da energia do bagaço em cogeração, que fornece 150,79GJ/ha de energia térmica, temos um excedente de energia na forma de energia elétrica, de 3,40GJ/ha, como coproduto da produção de 123,07GJ/ha na forma de E1G.

Com estes dados, é nítido que é cultivado duas formas de energia no campo: a energia do açúcar que resulta no E1G, e a energia do bagaço que supre a energia da fase industrial. Sem a energia do bagaço, E1G seria energeticamente inviável. Ao comparar EROI de E1G com outros biocombustíveis, é necessário levar em conta o possível crédito energético da biomassa que é abandonado no campo ou usado para outros fins.

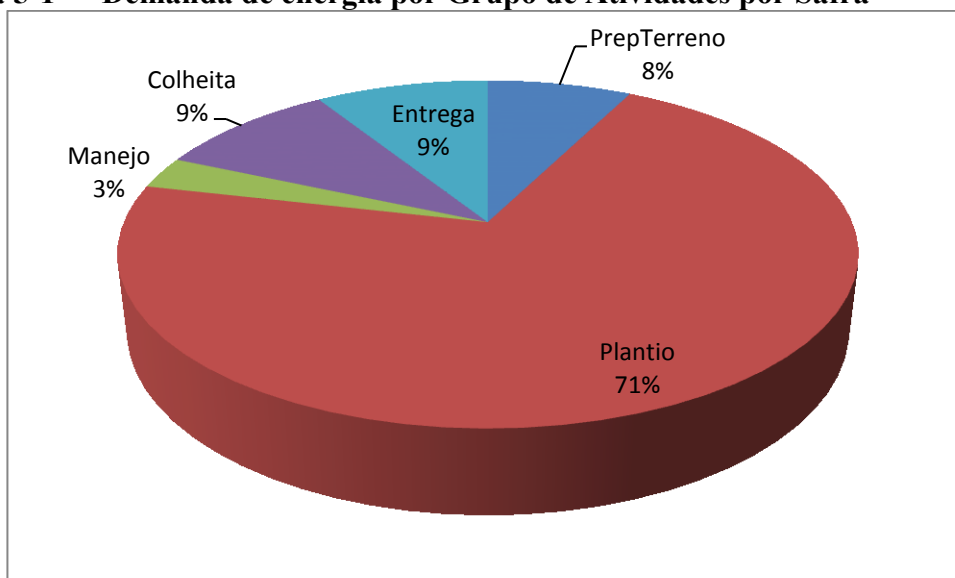
Na fase Agrícola, os grupos de atividades que mais contribuem para a demanda de energia são os grupos Plantio, Colheita e Entrega, como pode ser visualizado na Tabela 5-1 e na Figura 5-1. A energia é dada em GJ por hectare por safra, portanto a energia de atividades executadas uma única vez por ciclo de 6 anos, como Preparação do Terreno e Plantio, já são rateados por 5 safras.

**Tabela 5-1 Demanda de energia por Grupo de Atividades por Safra**

<b>Grupo</b>	<b>GJ/ha</b>
<b>PrepTerreno</b>	<b>5,27</b>
<b>Plantio</b>	<b>49,69</b>
<b>Manejo</b>	<b>2,09</b>
<b>Colheita</b>	<b>6,61</b>
<b>Entrega</b>	<b>6,30</b>

**Fonte: Elaboração do Autor**

**Figura 5-1 Demanda de energia por Grupo de Atividades por Safra**



**Fonte: Elaboração do Autor**

O Grupo Plantio tem uma demanda muito alta de energia motivado pelo uso de insumos agrícolas, e não pelo uso intensivo de máquinas e equipamentos, conforme Tabela 5-2.

**Tabela 5-2 Energia por Atividade por Safra no Grupo Plantio em MJ/ha**

<b>Adubação N</b>	<b>39.474,99</b>
<b>Adubação P2O5</b>	<b>7.719,09</b>
<b>Adubação K2O</b>	<b>1.511,36</b>
<b>Distribuição de mudas</b>	<b>579,57</b>
<b>Fechamento do sulco e aplicação de inseticida</b>	<b>250,34</b>
<b>Cultivo químico no plantio</b>	<b>44,32</b>
<b>Cultivo mecânico</b>	<b>107,02</b>

**Fonte: Elaboração do Autor**

As maiores demandas de energia estão no uso de adubos agrícolas, que além dos dados de energia de produção com fronteira ampliada, também incluem energia de movimentação dos adubos em território brasileiro. Note que nesta demanda energética não está incluso a energia para importação de adubos de países do exterior, portanto a demanda de energia real em 2017 é superior aos números relatados. A grande contribuição vem dos nitrogenados, quando se leva em conta a energia do gás natural usado como fonte de hidrogênio para produção de amônia. Os detalhes sobre nitrogenados estão na seção 2-14. Este número é uma estimativa otimista, no cenário sob estudo, a fonte de hidrogênio deverá ser uma biomassa, com balanço de energia pior

que o atual, pois terá que ser produzido para depois servir de fonte de hidrogênio para a manufatura de amônia. O uso correto do Fator F também influenciou muito nos valores de energia. Ao olhar o vetor energia com seus componentes, nota-se que energia fóssil direta, na forma de diesel, é uma fração não dominante na energia total de cada atividade, confirmando que a energia indireta e invisível é o grande contribuinte para a demanda energética.

Grupo Colheita usa maquinaria pesada, com motores de alta potência. Estes dois fatores influencia muito a energia indireta (aço, pneus, manutenção) pelo elevado peso e complexidade dos equipamentos, e também influencia muito o uso de energia fóssil. A colheita termina com a cana cortada no solo ainda. As atividades de carregamento no caminhão e de transbordo da cana até a área de expedição para usina consomem quantidade significativa de energia fóssil. Tem que fazer várias viagens de caminhão RJ (entre 3 a 4 viagens) para um hectare, em caminhos de terra, com alto consumo de combustível.

Grupo Transporte movimentava a cana colhida da área de expedição da fazenda até a usina. Apesar de ser considerada a atividade em estradas asfaltadas, a distância é um pouco maior, e tem a viagem de volta vazia com o veículo de carga. A baixa densidade da carga, alta resistência aerodinâmica da carroceria aberta, elevado número de pneus por veículo de carga, e o fato de 70% (setenta por cento) da carga ser água pura, eleva muito a intensidade de energia deste Grupo de atividades.

Na Fase Industrial, as necessidades de energia foram concentradas em 3 Grupos, seguindo um padrão da literatura. Os Grupos estão na Tabela 5-3.

**Tabela 5-3 Demanda de energia por Grupo de Atividades em MJ/ha**

<b>Necessidade vapor processo</b>	<b>97.447,68</b>
<b>Necessidade energia mecânica</b>	<b>14.014,88</b>
<b>Necessidade energia elétrica</b>	<b>10.740,56</b>

**Fonte: Elaboração do Autor**

A necessidade de vapor foi considerada em 380kg de vapor por tonelada de cana processada, baseado em ZAMPIERI (2005), valor muito menor que os 500kg de vapor de MACEDO (2004). A energia foi levantada em tabela de vapor saturado, e deduzida da energia térmica resultante da queima do bagaço de cana com PCI médio relatado pela literatura.

A energia mecânica foi calculada usando uma média dos valores da literatura, em kWh, foi considerada que toda a usina está eletrificada para maximizar o rendimento energético. A eletricidade líquida foi transformada em energia térmica usando rendimento total de 33,25% entre energia primária disponível e energia elétrica líquida.

Contando com a energia de 150,79GJ/ha de energia térmica pela queima do bagaço, com rendimento de 85% da caldeira, resultando em 128,18GJ/ha de energia térmica líquida, deduzindo as necessidades de vapor de processo, energia mecânica e energia elétrica, chegamos a um excedente elétrico de 3,40GJ/ha, que pode ser exportada para a rede pública.

Este excedente elétrico líquido, calculado de maneira independente, é consistente com a média da literatura (alguns por cento da energia total). Na literatura alguns autores relatam o excedente em energia térmica, outras relatam excedente em kWh de eletricidade, e finalmente alguns relatam excedente em kWh mas equivalente a energia termica sem conversão para energia elétrica.

Surpreendentemente, a intensidade de energia da Fase Distribuição é comparável à energia necessária no Grupo Entrega dentro da Fase Agrícola. Embora as distâncias sejam bem maiores (268,35km até distribuidora, 68,93km até o posto de combustível). A explicação é que estamos usando caminhões otimizados para largo volume, muito mais aerodinâmicos, e estamos transportando energia pura, sem os 70% de água quando transportava cana colhida. No mínimo, é como se a distância fosse dividida por 3. Além disso, usando caminhões com 45.000 litros, deve ser notado que o consumo de combustível varia pouco quando se dobra o peso transportado, pois a resistência de rolamento de um caminhão em estrada asfaltada é uma fração pequena da resistência aerodinâmica. Por isso, a economia de escala de veículos como bitrem e rodotrem é significativa em relação aos veículos de cana colhida.

Detalhes sobre resultados intermediários e finais do Vetor Energia, estão na seção 4-4 e nos Apêndices.

### **5.3 Energias não Contabilizadas**

Por um lado, a energia necessária ainda está um subestimada, pois várias energias indiretas que não foram inclusas. Os motivos e justificativas vão desde a não necessidade da energia no cenário de falta de energia fóssil, passando pela falta de

dados confiáveis. Em caso de dúvida, a energia é notada, porém não contabilizada. O Quadro 5-1 resume as energias, a combinação Fase/Grupo de Atividades que afeta, e observações/justificativas.

**Quadro 5-1 Energias não contabilizadas**

Energia	Afeta Fase/Grupo	Comentário
Importação adubos	Agrícola / Plantio	Sem energia fóssil, não é viável contabilizar energia usada na produção e importação internacional de adubos
Produção fonte H <sub>2</sub>	Agrícola / Plantio	Não foi incluído a energia usada na produção de gás natural para produção de nitrogenados pois sem energia fóssil, a fonte terá que ser uma biomassa a ser determinada, e portanto, com demanda energética ainda não determinada
Infra industrial adubos	Agrícola / Plantio	Não tem dados confiáveis sobre infraestrutura industrial de plantas produtoras de insumos e adubos agrícolas (peso, manutenção, materiais)
Infra industrial mineração	Agrícola / Plantio	Não tem dados confiáveis sobre infraestrutura operacional de mineração (peso, manutenção, materiais), como máquinas mineradoras, caminhões extra-pesados, máquinas de beneficiamento de minérios, pelletização, transporte de minérios a muita longa distância por meio ferroviário ou marítimo
Infra portuária	Agrícola Plantio	Infraestrutura portuária para suporte a importação em larga escala de insumos agrícolas
Implantação usina EIG	Industrial	Não tem dados confiáveis sobre custos energéticos de implantação de uma usina autônoma de EIG. Pode incluir novas estradas, terraplanagem, novas instalações de utilidades públicas (água, elétrica). Cada ampliação de volume de produção implica na implantação de novas usinas e sua infraestrutura.
Infra distribuição	Distribuição	Infraestrutura armazenamento e operação de Distribuidoras e Postos de combustível (predios, bombas, tancagem, pessoal, energia elétrica)
Serviços Ambientais	Agrícola	Um serviço ambiental não contabilizado neste estudo, é a perda de solo devido à erosão. A energia necessária é cerca de 3 ordens de grandeza acima dos valores registrados neste estudo. A perda é cerca de 0,4mm por ano no cultivo da cana. A camada fértil com granulometria correta varia de 0,5 metros a 2,0 metros. detalhes na seção 2-23

**Fonte: Elaboração do Autor**

## 5.4 Oportunidades de Melhorias

Por outro lado, existe a oportunidade de grandes melhorias na fase agrícola, enquanto a fase industrial já é uma tecnologia madura. Quanto à fase de distribuição, terá que ser criada uma nova infraestrutura que minimize o uso de caminhões e transporte rodoviário.

Na fase agrícola, as variações de produtividade variam muito de uma região para outra, podendo variar de 1 para 2 a produtividade relativa. É alta no sudeste e sul, é baixa no norte e nordeste, bom no centro oeste (CONAB, 2016a). Esta grande variação de resultados não é resultado de falta de tecnologia, mas reflete a atividade de risco que é a agricultura. Depende muito do clima, do tempo na época de colheita, principalmente da chuva recente, análise do solo em curtos intervalos, custo de adubos e insumos agrícolas, e claro, aconselhamento técnico com engenheiros agrônomos competentes proprietários dispostos a aceitar mudanças.

Por conta de tantas variáveis, tem que haver um grande esforço em otimização regional, onde cada região com suas características tem que ser estudada em detalhes e definido o melhor perfil de cultivo (ou produção industrial de biomassa) para cada mesoregião ou microregião geográfica. Uma alternativa ainda não explorada é verificar as condições eólicas da região nordeste, e avaliar a possibilidade de entremear geração eólica no meio da plantação de cana. desta maneira, o terreno pode ser melhor aproveitado para o indicador APF em  $W/m^2$ . Também aproveitaria a própria infraestrutura de distribuição para a exportação da energia elétrica excedente da usina.

Como a maior contribuição de demanda de energia na fase agrícola é o uso intensivo de insumos, é necessário muito mais pesquisas para o desenvolvimento de processos e tecnologia de reciclagem de nutrientes, com aproveitamento integral da torta de filtro, vinhaça, palhico, e cinzas da caldeira de cogeração. Especial atenção deve ser prestado para minimizar perda de nutrientes por lixiviação, e procurar usar insumos que tenham um fator F o menor possível.

A fase industrial, com os dados atuais, tem um excedente atual de energia relativamente pequeno, mesmo adotando as últimas tecnologias em processos. Um foco de melhoria é o uso de calor residual, talvez até o calor da fermentação exotérmica, para concentrar o máximo possível a vinhaça, para minimizar o custo de movimentação para fins de adubo.

Conforme já relatado, o crédito de energia da palha ou palhiço não foi considerado por não ter referências detalhadas e confiáveis para um estudo detalhado desta etapa de enfiamento e transporte até a usina. Nem estudos sobre o aproveitamento em caldeiras projetadas para consumo de bagaço com composição relativamente homogênea. Temos que lembrar que palhiço contém palha relativamente homogênea, mas também contém as pontas da cana cortada, com folhas verdes. Por isso, foi deixado de fora da contabilização nesta dissertação. Alguns autores incluem metade da energia potencial do palhiço no balanço energético, sem débito da energia de enfiamento, carregamento, transbordo e transporte, gerando EROI excessivamente otimista.

Finalmente, temos muito poucos estudos sobre operações reais da agricultura do norte e nordeste. Como a maioria das pesquisas acadêmicas sobre o ciclo do EIG é feito por pesquisadores das maiores universidades do sul e sudeste, os dados usados são de fazendas do sudeste. As associações de classe como Unica, CTC e CTBE são entidades baseados no sudeste, portanto os dados agregados que fornecem são do sudeste, com uma produtividade bem acima da média brasileira. É necessário pesquisas focadas em variedades de cana melhor adaptadas para o clima e solo das regiões norte e nordeste. Pode ser mais rentável energeticamente uma variedade de cana que produza menos ATR mas produza muito mais bagaço para queima direta em geração elétrica.

O Quadro 5-2 resume os itens que podem melhorar o balanço energético.

**Quadro 5-2 Resumo pontos a melhorar na eficiência energética**

Item	Considerações
Eng Genética	Escolha do melhor cultivar para cada região específica, melhor aproveitamento de biomassa como bagaço e palhiço, menor uso de adubos. Menos foco em açúcar, mais foco em energia total.
Foco em energia	Estudos focando balanço energético total sem subsídio governamental sobre crédito, custos, insumos. Balanço de energia mais importante que balanço financeiro
Reciclagem de adubos	Insumos agrícolas e nutrientes são os grandes consumidores de energia total. Reciclagem máxima no campo com dupla vantagem: menos poluição ambiental e menos energia para trazer insumos e nutrientes



Mix energias mesmo terreno	Procurar usar o mesmo terreno para produzir mais de uma forma de energia, gerando biomassa e eólica e fotovoltaica simultaneamente. Possibilidade de veículos elétricos no campo com geração local por meio fotovoltaico ou eólico
Reciclagem energia industrial	Modificação de processos para máxima reciclagem de energia entre processos, com recuperação de calor de processos exotérmicos
Uso do palhiço	Novos estudos de adensamento do palhiço do campo para aproveitamento em caldeiras. Grande obstáculo atual é baixa densidade para transporte até usina, além da homogeneização do palhiço. Poucos estudos reais sobre custo energético de enfardamento e compactação.
Dados mais reais	Novos estudos com levantamento estatístico de dados reais tanto na fase agrícola como na fase industrial. Atualmente são usados muitas médias sem correlação estatística entre dados e características agrícolas e industriais, distorcendo conclusões sobre eficiência energética e EROI. Indicadores distorcidos não permitem foco em melhorias específicas.

**Fonte: Elaboração do Autor**

## 5.5 Limitações Futuras

Uma vez comprovada a sustentabilidade absoluta ( $EROI > 1$ ) do EIG, é chegada a hora de analisar a sustentabilidade relativa. Podemos suprir toda a energia que usamos atualmente em 2016? Para isso é necessário examinar o indicador TONP<sup>1</sup>. A relação entre EROI e TONP é ilustrada pela Tabela 5-4, onde se nota o crescimento dramático da energia total a ser produzida para a mesma energia líquida necessária, quando EROI se aproxima de 1,00. O que enfatiza que com EROI atual já perto de 1,5, é necessário estudos muito rigorosos, apoiados em estatísticas confiáveis, para toda a cadeia produtiva do EIG a partir de cana-de-açúcar. A imprecisão dos dados primários, notados durante a revisão bibliográfica, é irrelevante quando se estima um EROI otimista ao redor de 8 a 11. Com EROI calculado nesta dissertação, estamos muito perto do limite da inviabilidade real por falta de recursos limitantes como terra disponível e infraestrutura industrial além de falta de insumos agrícolas.

<sup>1</sup> TONP Total Over Net Production, o quanto de produção total para conseguir a energia líquida desejada. Calculada como  $TONP = (EROI)/(EROI-1)$ .

**Tabela 5-4 Relação entre EROI e TONP**

EROI	2,00	1,90	1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,05	1,03
TONP	2,00	2,11	2,25	2,43	2,67	3,00	3,50	4,33	6,00	11,00	21,00	41,00

**Fonte: Elaboração do Autor**

Usando os dados oficiais de EPE (2015), CONAB (2015), IBGE (2016), Brasil usa 306,5MTEP de energia, 5,01 milhões de hectares para produção de cana dedicado ao E1G (é usado aproximadamente 9 milhões de hectares para cana, o saldo de 4 milhões de hectares é usado para produção de açúcar), e produção de 28,8 bilhões de litros de E1G em 2015.

Esta quantidade só corresponde a 4,7% de toda a energia usada em 2015. Portanto, é necessário produzir 21 (vinte e uma) vezes a quantidade atual de E1G para fornecer toda a energia necessária, sem mudar a economia como um todo e sem diminuir o padrão de vida material do brasileiro. Uma parte dessa energia já é renovável (hidrelétrica, eólica, fotovoltaica). Usando os detalhes do Epe (2015), a energia fóssil a ser substituída, incluindo a energia importada (que contém energia primária), é de 307,1 MTEP. Com um EROI de aproximadamente 1,67, é preciso aumentar a área plantada em aproximadamente 52,5 vezes, além de uma infraestrutura industrial 52,5 vezes maior (algo como 21.000 usinas a longo prazo) além de quantidades equivalentes de tratores, caminhões, carregadeiras, e outros equipamentos de infraestrutura industrial e agrícola.

Sem possibilidade de importação de insumos e adubos agrícolas por falta de energia fóssil, é necessário desenvolver tecnologia para reciclagem de 100% de todo nutriente usado na agricultura.

A área necessária é equivalente ao estado do Amazonas mais metade do estado do Pará para agricultura, além da área necessária para as novas usinas e estradas para movimentação da biomassa e biocombustível.

Em resumo: a produção de E1G é termodinamicamente sustentável, mas relativamente insustentável, pois não haverá terra, infraestrutura e insumos suficientes. Energia de E1G é uma necessidade a longo prazo, pois tem o benefício de reciclar CO<sub>2</sub> da atmosfera. Mas precisa ser complementado por outras formas de energia renovável como fotovoltaica, calor solar concentrado e eólica, além de outras biomassas.

Finalmente, é notado que a longo prazo, sem energia fóssil, é necessário substituir toda a produção de petroquímicos como plásticos, lubrificantes, gás natural, fonte de hidrogênio, solventes, asfaltos, gases combustíveis diversos, etc.

Em 2016, o consumo mundial médio de petróleo foi de 96 milhões de barris por dia. destes 96 milhões, aproximadamente 52 milhões de barris são consumidos como combustíveis líquidos. Portanto, aproximadamente 44 milhões de barris diários são coprodutos petroquímicos como plásticos e outros subprodutos, que precisarão ser substituídos. Guardando a mesma proporção para o Brasil, sem energia fóssil, é preciso substituir pelo menos 140,5MTEP de fontes de hidrocarbonetos para substituir os produtos petroquímicos usados em 2015/2016, equivalente a 10 (dez) vezes a produção total de E1G em 2016.

Nossas preocupações, sem energia fóssil, vão muito além de combustível renovável para veículos. Todo um estilo de vida baseado em subprodutos petroquímicos, principalmente plásticos, terá que ser repensado, novas tecnologias terão que surgir.

## **5.6 Diferenças nos resultados**

A grande diferença entre o EROI calculado neste estudo e as referências mais citadas na literatura reside nos resultados da Fase Agrícola, embora cada Fase contribua para um EROI menor que as relatadas pela literatura. O Quadro 5-3 resume as principais influências, sendo cada Fator detalhado nos parágrafos seguinte.

**Quadro 5-3 Resumo dos fatores que diferencia o valor do EROI**

Fase	Fator	Observações
Agrícola	Nitrogenados	Estudo cuidadoso da energia para produção de nitrogenados, incluindo energia do gás natural como fonte de hidrogênio, quase dobra energia
	Fator F	Necessidade de nitrogênio relatado não inclui fator F, que varia conforme o nitrogenado usado
	Movimentação insumos	Movimentação de insumos agrícolas (cal, gesso, adubos) por longa distância acrescenta muita energia direta e indireta ao insumo.
	Produtividade real	Produtividade agrícola usando valores médios para todo o Brasil, e não somente a alta produtividade das melhores fazendas de SP
	Recálculo dados secundários	Muitos dados secundários, ao serem recalculados, usando os mesmos dados primários e a mesma metodologia do autor, revelaram resultados bem diferentes dos relatados.
	Crédito sem ônus	Crédito de energia de resíduos agrícolas sem ônus energético de processamento, como a energia do palhço sem uso de energia para enfardamento e transporte até a usina
Industrial	Usina autônoma	Eliminado volume de EIG derivado de melaço de açúcar, e que era incluído nas estatísticas de produção da usina anexa. É eliminado uma média de 15 litros originados de melaço de açúcar. A produção de EIG no futuro será ordens de grandeza acima da produção futura de açúcar
	Recálculo excedente real energia	Excedente de energia agora é relatada exclusivamente em kWh de eletricidade gerada, não em energia térmica teórica disponível. Reduz a energia disponível para cerca de 1/3 (um terço) do valor de muitos autores
Distribuição	Fator novo	A literatura não inclui esta fase. A contribuição é significativa, sendo semelhante aos Grupos Colheira e Entrega da Fase Agrícola. Devido à pulverização geográfica das usinas e fazendas, não é um fator que pode ser desprezado

**Fonte: Elaboração do Autor**

A energia necessária para a produção dos nitrogenados foi um fator predominante na energia agrícola. A maior parte das referências bibliográficas foca na produção do nitrogenado, mas não amplia a fronteira para incluir produção de amônia, e muito menos na energia do gás natural usado como fonte de hidrogênio. Seção 2-13 tem detalhes de processos, equações químicas, e balanços de energia, além de referências bibliográficas, justificando o valor a maior da energia indireta nos nitrogenados,

principalmente na uréia, o mais usado no Brasil devido ao baixo custo. Além disso é necessário lembrar que muitos autores não especializados em agronomia, usam as referências da área agrônômica que relatam as necessidades de nitrogênio atômico, não de compostos padronizados como  $K_2O$  e  $P_2O_5$ . Assim, se um autor da área agrônômica indica a necessidade de 80kg de nitrogênio por hectare por safra, é necessário notar que precisa de muito mais massa de composto de nitrogênio (como uréia, sulfatos, fosfatos). Isso influi na energia indireta do nitrogenado, no Fator F (uréia é extremamente volátil quando aplicado no solo), e na energia indireta de transporte e aplicação do insumo agrícola. O menor fator F para nitrogênio é de 2,0 embora fator F para  $K_2O$  e  $P_2O_5$  sejam menores. Apêndices tem mais detalhes sobre Fator F de cada insumo importante.

Movimentação de insumos agrícolas normalmente é ignorada na literatura, mas tem uma contribuição importante por movimentar toneladas por hectare por safra por distâncias de centenas de quilômetros. Sem contar com a distância de importação de adubos. Portanto tem bastante energia direta e muita energia indireta dos veículos.

Produtividade agrícola usada pela maioria dos autores é a de SP, bem mais alta que a média brasileira. No cenário sem energia fóssil, tem que usar a média brasileira de produtividade agrícola, e não o melhor caso. A diferença é da ordem de 20%, bastante significativo como contribuição individual para EROI.

Produtividade industrial relatada em muitos casos está acima da produtividade teórica estequiométrica usando os dados de ATR relatados por CONAB e entidades de classe. Esta correção afetou muito a produtividade agrícola em litros de E1G por hectare. Mais detalhes em Revisão Bibliográfica.

Ao considerar usinas autônomas apenas, é necessário retirar aproximadamente 15 litros de E1G por tonelada de cana processada. As estatísticas informadas pelas usinas geralmente incluem cerca de 15 litros vindo do melaço de açúcar da usina anexa que produz açúcar. Esta inclusão gera uma produtividade industrial acima da máxima produção estequiométrica de E1G baseado no ATR médio da cana entregue na usina. São mais uns 15% de influência na produtividade total em litros/hectare e portanto no EROI final.

Recálculo de dados secundários revelou que em muitos casos é impossível chegar aos mesmos resultados intermediários. Existem desde erros conceituais, omissões de valores e itens nos cálculos, e cópia de dados intermediários de outros autores sem a devida verificação de consistência. Na Revisão Bibliográfica tem mais

detalhes, assim como nos Apêndices. Muitas vezes o valor recalculado chegava a dobro ou triplo do valor relatado pelo autor.

Crédito sem ônus é usado por alguns autores, que usam 40% a 50% da energia teórica do palhicho como crédito de energia, sem contabilizar a energia necessária para processar e transportar o palhicho para a usina. Alguns autores procuram incluir etanol segunda geração usando resíduos agrícolas, sem contabilizar a energia necessária para o processamento da biomassa e seu transporte até uma usina especializada. Desta maneira, melhora muito EROI sem o ônus de consumo de energia.

Distribuição inclui parcela significativa de energia, pois contribui com valores semelhantes aos Grupos Colheita e Entrega da Fase Agrícola. Este fator é novo.

Os valores de EROI relatados na Tabela 2-3 seção 2-12 variam de 3,15 até 9,4. A literatura referencia quase de maneira predominante os valores de 8,3 a 9,4 do MACEDO (2004 e 2009). Os fatores resumidos nesta seção explicam facilmente a diferença entre valores de EROI na faixa de 3,15 a 3,70 da Tabela 2-3 para 1,67. A simples mudança de produtividade total de etanol em litros/hectare já explica boa parte da diferença. A maior parte das diferenças está no recálculo dos dados intermediários. Nesta dissertação, a maioria absoluta dos dados primários vem da fonte mais citada, MACEDO (2004) e todos os dados intermediários ou secundários são recalculados com detalhes da metodologia, nos Apêndices.

## **5.7 Outras Energias Renováveis**

Uma fonte de energia pode ser sustentável sob o ponto de vista energético, mas ser inviável por falta de recursos físicos suficientes para implementá-la em larga escala. A forma de energia que usar o mínimo de recursos é a mais desejada, dentro da mesma faixa de rendimento energético.

Uma métrica é o indicador APWeq, conforme detalhado na seção 2-6. As fontes atuais de energia sustentável sempre ocupam uma área de terreno, seja aproveitando energia solar direta, seja eólica, seja usando biomassa. Quanto maior este indicador, melhor o aproveitamento do terreno disponível. E portanto melhor a eficiência de captação da energia solar primária.

Os resultados reais para E1G indicam que a APWeq do E1G brasileiro está pouco abaixo de  $0,4 \text{ W/m}^2$  (cálculo do autor, detalhado na Seção 2-7) com a produtividade atual de E1G em safras anuais. Para suprir toda a energia consumida pelo Brasil em 2015 usando exclusivamente E1G, usando a mesma terra de 2016, precisamos de uma APWeq maior que  $20 \text{ W/m}^2$  (cálculo do Autor usando EROI calculado para E1G). Portanto, E1G tem que ser complementado por outras fontes de energia sustentável. Porém a produção de E1G e talvez E2G a partir de resíduos de outras biomassas, é absolutamente necessário, pois diminui a nossa CFP, retirando  $\text{CO}_2$  da atmosfera durante a formação da biomassa.

EROI, embora seja o indicador mais importante para uma energia considerada renovável, não é o único fator limitante ou determinante para a sua adoção. No futuro previsível, temos 3 classes de energias renováveis disputando a matriz energética brasileira. Bioenergias, solar fotovoltaica (PV) e eólica. Cada uma dessas classes tem EROI diferentes, necessidades de áreas diferentes, e impactos ambientais diferentes (impacto eólicas sobre microclima).

Mesmo entre as bioenergias, é necessário um estudo do etanol de milho, usando a mesma metodologia aplicada nesta dissertação para o E1G de cana-de-açúcar, incluindo créditos de energia das folhas e caule, e débitos detalhados de energia de insumos agrícolas e manejo. Milho tem a grande vantagem de ter pouca umidade no grão, tornando viável o seu transporte a maiores distâncias e portanto, melhor economia de escala na usina produtora de etanol. Por outro lado, não tem estudos atuais que foquem no aproveitamento do resto da biomassa da planta do milho (caule e folhas) como fonte de energia térmica.

Mesmo aceitando um modesto fator de aproveitamento total de 1/50 para energia fotovoltaica, incluindo as perdas de energia por proteção mecânica (vidros) e sujeira superficial (sujeira atmosférica depositada na superfície), e perdas do conversão de DC para AC, e perdas de armazenamento nas baterias, é uma ordem de grandeza melhor que o aproveitamento da energia solar pelo E1G.

Energia eólica é energeticamente rentável em algumas regiões do Brasil, onde predominem ventos relativamente constantes, como no nordeste. A incógnita é como vai ser afetado o microclima na região, retirando aproximadamente 1GW por quilômetro quadrado de potência da atmosfera.

Energia eólica tem a vantagem de economia de escala para produção comercial. Energia fotovoltaica tem a vantagem de poder ser usado em geração distribuída, em

microusinas solares, onde a energia é usada diretamente pelo consumidor final, economizando muita infraestrutura de transmissão e distribuição.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTON, Estevão Minatto. **Produção de cana de açúcar: do Planejamento do Plantio à Colheita**. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012, 47p. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/100126> acesso em 08 junho 2014
- ALMEIDA, Mario Alverto de. **A energia da cana-de-açúcar**. UNICA, São Paulo, SP, 2007, 232p. Disponível em <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=2447557> acesso em 23 abril 2014.
- ALVES, Francisco. **Por que morrem os cortadores de cana?** Saúde e Sociedade v.15, n.3, p.90-98, São Paulo, SP, 2006, 9p. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/sausoc/v15n3/08.pdf> acesso em 08 outubro 2015.
- ANDREOLI, Claudinei; SOUZA, Simone Pereira. **Cana-de-Açúcar: A Melhor Alternativa para Conversão da Energia Solar e Fóssil em Etanol**. E&E - Organização Social Economia e Energia, Belo Horizonte, MG, 2014, 18p. Disponível em [http://ecen.com/eee59/eee59p/comparacao\\_de\\_resultados\\_de\\_energia\\_eletrica.htm](http://ecen.com/eee59/eee59p/comparacao_de_resultados_de_energia_eletrica.htm) acesso em 21 julho 2016.
- ANDRIETTA, Silvio Roberto. **BIOEN Workshop on process for ethanol production - FAPESP**. BioContal, Brasil, 2009, 51p. Disponível em [http://www.fapesp.br/eventos/2009/09/10\\_bioen/Silvio\\_Roberto.pdf](http://www.fapesp.br/eventos/2009/09/10_bioen/Silvio_Roberto.pdf) acesso em 12 novembro 2014
- ASSIS, Andre Koch Torres. **The Experimental and Historical Foundations of Electricity**. C. Roy Keys Inc., Montreal, Quebec, Canada, 2010, 270p. Disponível em <http://www.ifi.unicamp.br/~assis/Electricity.pdf> acesso em 17 novembro 2016
- BAHER, Shaimaa. **Estimation of energy requirements**. Faculty of Medicine, Cairo University, Egypt, 2012, 38p. Disponível em [http://www.emaso-eg.org/Emaso\\_workshop%20presentation/Human%20energy%20requirements.pdf](http://www.emaso-eg.org/Emaso_workshop%20presentation/Human%20energy%20requirements.pdf) acesso em 08 outubro 2015.

BARBOSA, Alexandrius de Moraes. **Eficiência da Conversão de Energia Luminosa em Fito-Energia no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar sob déficit hídrico.** Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2012, 59p. Disponível em [http://tede.unoeste.br/tede/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=349](http://tede.unoeste.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=349) acesso em 08 junho 2014

BELARDO, Guilherme de Castro. **Avaliação de desempenho efetivo de três colhedoras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) sem queima.** ESALQ, USP, Piracicaba, 2010, 137p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/index.php?option=com\\_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br](http://www.teses.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br) acesso em 16 maio 2015.

BENEDINI, Mauro Sampaio; PENATTI, Claudimir Pedro. **Recomendação de adubação da cana-de-açúcar pela estimativa de produtividade.** Revista Coplana, Guariba, SP, janeiro 2008, 2p. Disponível em <http://www.coplana.com/gxpfiles/ws001/design/RevistaCoplana/2008/Fevereiro/pag20-21.pdf> acesso em 25 abril 2014.

BERNARDO NETO, Osvaldo. **Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (segunda geração) nas atuais linhas de processamento de cana-de-açúcar (primeira geração).** Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2009, 138p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-02062009-164523/publico/DISSERTACAO\\_OSVALDO\\_BERNARDO\\_NETO.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-02062009-164523/publico/DISSERTACAO_OSVALDO_BERNARDO_NETO.pdf) acesso em 29 junho 2014

BOUSTANI, Avid; SAHNI, Sahni; GUTOWSKI, Timothy; GRAVES, Steven. **Engine Remanufacturing and Energy Savings.** Environmentally Benign Manufacturing Laboratory, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 2010, 29p. Disponível em <http://web.mit.edu/ebm/www/Publications/MITEI-1-d-2010.pdf> acesso em 11 junho 2016

BOUSTANI, Avid; SAHNI, Sahni; GUTOWSKI, Timothy; GRAVES, Steven. **Tire Remanufacturing and Energy Savings**. Environmentally Benign Manufacturing Laboratory, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 2010a, 78p. Disponível em <http://web.mit.edu/ebm/www/Publications/MITEI-1-h-2010.pdf> acesso em 13 maio 2016.

BP. **Statistical Review of World Energy**. BP P.L.C., London, UK, 2017, 50p. Disponível em <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf> acesso em 10 outubro 2017

CARDOSO, Gilda Brasil Camargo. **Aplicação de dessecante na cultura de cana-de-açúcar para colheita mecanizada**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2011, 72p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-02082011-100046/pt-br.php> acesso em 08 junho 2014

CARREIRA, Marcio Luis. **Desempenho operacional, econômico e energético do transporte de cana-de-açúcar: um estudo de caso**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2010, 82p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/index.php?option=com\\_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br](http://www.teses.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br) acesso em 16 maio 2015.

CHANG, Sheu-Shang. **Medição, com pêndulo duplo, da resistência ao corte do colmo de cana-de-açúcar**. Revista Científica do Instituto Agronômico, Unicamp, Campinas, SP, 1982, 10p. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/brag/v41n1/02.pdf> acesso em 07 outubro 2015.

CHEN, Francis F.. **An Indispensable Truth: How Fusion Power Can Save the Planet**. Springer Science + Business Media LLC, New York, NY, USA, 2011, 32p. Disponível em [http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9781441978196-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1143143-p174056562](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781441978196-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1143143-p174056562) acesso em 26 março 2016.

CHU, Steven; Goldemberg, José. **Lighting the way - Toward a sustainable energy future**. IAC - Inter Academy Council , Amsterdam, Netherlands, EU, 2007, 208p. Disponível em <http://www.interacademycouncil.net/File.aspx?id=24548> acesso em 28 julho 2016.

CIPEC. **Benchmarking the Energy Consumption of Canadian Open-Pit Mines**. CIPEC - Canadian Industry Program for Energy Conservation, Ottawa, Canada, 2005, 62p. Disponível em <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oe/pdf/publications/industrial/mining/open-pit/Open-Pit-Mines-1939B-Eng.pdf> acesso em 14 fevereiro 2016.

CIPOLLA, Carlo M.. **The Fontana Economic History of Europe Vol 1: The Middle Ages**. Barnes and Nobles, New York, USA, 1976, 389p.

CLEVELAND, Cutler J.. **Energy quality and energy surplus in the extraction of fossil fuels in the U.S.** Ecological Economics, 6 (1992) 139-162 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Holland, 1992, 24p. Disponível em [http://www.eoearth.org/files/151301\\_151400/151375/e-quality\\_net-energy\\_oil.pdf](http://www.eoearth.org/files/151301_151400/151375/e-quality_net-energy_oil.pdf) acesso em 26 março 2016.

COCHRAN, Thomas B. et al.. **Fast Breeder Reactor Programs: History and Status**. International Panel on Fissile Materials, 2010, 128p. Program Science and Global Security, Princenton University, Princenton, New Jersey, USA, 2010, 128p. Disponível em <http://fissilematerials.org/library/rr08.pdf> acesso em 02 novembro 2016

COELHO, Marcelo Francisco. **Planejamento de qualidade no processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2009, 75p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-10112009-094523/pt-br.php> acesso em 08 junho 2014

COHEN, Matthew J.; BROWN, Mark T.; SHEPHERD, Keith D. **Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis**. Agriculture Ecosystems and Environment vol 114 (2006) pages 249–269, Elsevier, Nairobi, Kenya, 2005, 21p. Disponível em <http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/ja06026.pdf> acesso

em 10 outubro 2015.

COMITRE, Valeria. **Avaliação Energética e Aspectos Econômicos da *Filière* Soja na Região de Ribeirão Preto**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1993, 164p. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000081652&fd=y> acesso em 29 setembro 2016

CONAB, Brasil. **15\_09\_11\_11\_17\_44\_canaseriehist\_-\_site.xls**. Serie Histórica Cana, Conab, 2015, 1p. Disponível em [http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos) acesso em 02 outubro 2015.

CONAB, Brasil. **A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil: Análise do Desempenho da Safra 2009-2010**. Diretoria de Política Agrícola e Informações, Superintendência de Informações do Agronegócio, CONAB, MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF, 2011, 160p. Disponível em [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_05\\_05\\_15\\_45\\_40\\_geracao\\_termo\\_baixa\\_res..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf) acesso em 28 março 2016.

CONAB, Brasil. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. Conab - Companhia Nacional de Abastecimento, MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF, **2016a**, 1 planilha. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto> acesso em 03 agosto 2016.

CONAB, Brasil. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. Conab - Companhia Nacional de Abastecimento, MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF, **2016b**, 66p. Disponível em [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_04\\_18\\_14\\_27\\_15\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_1o\\_lev\\_-\\_16.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_16.pdf) acesso em 03 agosto 2016.

CORTEZ, Luíz Augusto Barbosa. **Universidades e empresas:40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. FAPESP, São Paulo, SP, 2016, 225p. Disponível em <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/openaccess/9788521210627/completo.pdf> acesso em 07 fevereiro 2017

COSTA, Carlos Eduardo Lampert. **Energy Generation at Sugarcane Mills Using Trash and Bagasse**. Ponto Focal Operacional do GEF no Brasil, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão - SEAIN, Brasília, 2005, 37p. Disponível em [http://www.thegef.org/gef/sites/thegef.org/files/gef\\_prj\\_docs/GEFProjectDocuments/Cli mate%20Change/Brizal%20-%20Energy%20Generation%20at%20Sugarcane%20Mills%20Using%20Trash%20and%20Bagasse/PDF%20B%20Brazil%203515%2014%20Oct%20FINAL.DOC](http://www.thegef.org/gef/sites/thegef.org/files/gef_prj_docs/GEFProjectDocuments/Cli mate%20Change/Brizal%20-%20Energy%20Generation%20at%20Sugarcane%20Mills%20Using%20Trash%20and%20Bagasse/PDF%20B%20Brazil%203515%2014%20Oct%20FINAL.DOC) acesso em 08 março 2014.

COSTA, Leandro Garcia da. **Simulação do efeito da palhada e adubação nitrogenada na produtividade de cana de açúcar**. Centro de Ciências Agrária, Ufscar, Araras, 2012, 96p. Disponível em <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74234/1/DissLGC-1.pdf> acesso em 02 abril 2014

CUNHA FILHO, Joaquim Henrique da. **A estrutura socioeconômica da produção de etanol no Brasil: o uso de fatores primários de produção e as suas relações intersetoriais**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2009, 167p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-22032010-152538/pt-br.php> acesso em 08 junho 2014

DIAS, Marina O.S. et al. **Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process**. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2009, 11p. Disponível em <http://www.nipeunicamp.org.br/site/adm/modulos/publicador/documentos/arquivos/File/Publica%C3%A7%C3%B5es/Production%20of%20bioethanol%20and%20other%20bi o-based%20materials.pdf> acesso em 08 março 2014

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. **Fertilizantes: Uma Visão Global Sintética**. BNDES Setorial p. 97-138 setembro 2006, BNDES, Rio de Janeiro, RJ, 2006, 42p. Disponível em [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2404.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2404.pdf) acesso em 03 junho 2016.

DÍAZ, Marco Antonio; CARVALHO, Victor Cabral da Hora Aragão; GOMES, Marcos Sebastião de Paula. **Análise do Ciclo de Vida e Balanço Energético do Etanol da Cana-de-Açúcar Brasileira**. Sexto Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, 2010, 7p. Disponível em <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/conem/2010/PDF/CON10-0491.pdf> acesso em 29 junho 2014

DOE - US Department of Energy. **Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry**. DOE - Department of Energy, Washington, DC, USA, 2003, 13p. Disponível em <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/iron.pdf> acesso em 14 fevereiro 2016.

EPE. **Coleção Completa BEN - Balanço Energético Nacional 2005 a 2016**. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, 2016. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/default.aspx?anoColeta=2006> acesso em 24 julho 2016.

FAO, UN. **Energy Smart Food for People and Climate**. Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, FAO, Rome, Italy, 2011, 78p. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/014/i2454e/i2454e00.pdf> acesso em 27 julho 2016.

FAO/WHO/UNU. **Human energy requirements**. United Nations University, World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2001, 103p. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/007/y5686e/y5686e00.htm> OU <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5686e/y5686e00.pdf> OU <http://www.fao.org/3/a-y5686e.pdf> acesso em 08 outubro 2015.

FARIAS, Leonel Marques; SELBITTO, Miguel Afonso. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011, 10p. Disponível em [http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista\\_SIER/v.%2012,%20n.%2017%20\(2011\)/1.%20Uso%20da%20energia%20ao%20longo%20da%20hist%F3ria.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2012,%20n.%2017%20(2011)/1.%20Uso%20da%20energia%20ao%20longo%20da%20hist%F3ria.pdf) OU [http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista\\_SIER/v.12,n.17\(2011\)/1.Usodaenergiaaolongodahistoria.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.12,n.17(2011)/1.Usodaenergiaaolongodahistoria.pdf) acesso em 21 julho 2016

FERNANDES, Francisco Rego Chaves; LUZ, Adão Benvindo da; CASTILHOS, Zuleica Carmem. **Agrominerais para o Brasil.** Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Computação Científica – FACC, FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, DNPM/MME, Brasília, DF, 2010, 303p. Disponível em [http://www.cetem.gov.br/agrominerais/novolivro/agromineirais\\_para\\_o\\_brasil.pdf](http://www.cetem.gov.br/agrominerais/novolivro/agromineirais_para_o_brasil.pdf) acesso em 03 junho 2016.

FLOWE, Mike. **The Energy Costs Associated with Nitrogen Specifications.** Flowe Nitrogen Systems, Orange Beach, Alabama, USA, 2017, 6p. Disponível em <http://www.airbestpractices.com/system-assessments/air-treatmentn2/energy-costs-associated-nitrogen-specifications> acesso 04 abril 2017

FRANCO, José Alberto M. ; SARAIVA NETO, Afonso. **Produção De Fertilizantes Nitrogenados E Suprimento De Matéria-Prima.** FAFEN, Petrobrás, BA, 2007, 36p. Disponível em <http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/ENG%20504/fabrica%C3%A7%C3%A3o%20de%20nitrogenados%20e%20ureia.pdf> acesso em 20 março 2017.

GALO, Nícoli Pelá. **Controle de qualidade da cana-de-açúcar para industrialização.** Pós-Graduação Mta - Gestão Industrial Sucroenergética, Centro De Ciências Agrárias, Universidade Federal De São Carlos, Sertãozinho, SP, 2013, 42p. Disponível em <http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-iii-c/trabalhos/controle-de-qualidade-da-cana-de-acucar-para-industrializacao> acesso em 24 abril 2014.



GAMA, Mateus Brito. **Avaliação Econômica e Energética da Distribuição Direta do Etanol Hidratado no Estado de São Paulo**. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, SP, 2014, 95p. Disponível em [https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0ahUKEwiZ9rbmyuzNAhUMh5AKHU1wBQUQFghgMAk&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F18%2F18144%2Ftde-08072014-121712%2Fpublico%2FDissertacao\\_Mateus\\_v6.pdf&usg=AFQjCNEYHIMaMcBVFP5GyNrHOa24rjlfw&cad=rja](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0ahUKEwiZ9rbmyuzNAhUMh5AKHU1wBQUQFghgMAk&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F18%2F18144%2Ftde-08072014-121712%2Fpublico%2FDissertacao_Mateus_v6.pdf&usg=AFQjCNEYHIMaMcBVFP5GyNrHOa24rjlfw&cad=rja) acesso em 11 julho 2016.

GAO - USA. **CRUDE OIL: Uncertainty about Future Oil Supply Makes It Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production**. United States Government Accountability Office, Washington, DC, USA, 2007, 82p. Disponível em <http://www.gao.gov/new.items/d07283.pdf> acesso em 28 setembro 2016

GARCIA, Juan Carlos Claros. **Emissão de gases de efeito estufa na obtenção do etanol de cana-de-açúcar: uma avaliação considerando diferentes cenários tecnológicos em Minas Gerais**. Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011, 198p. Disponível em [http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-8RALYW/projeto\\_de\\_tese\\_juan\\_final.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-8RALYW/projeto_de_tese_juan_final.pdf?sequence=1) acesso em 11 setembro 2015.

GARG, Amit; PULLES, Tinus. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, UNEP/WMO, Genebra, Suíça, 2006, 319p. Disponível em <https://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol2.pdf> acesso em 20 fevereiro 2016.

GIACHINI, Camillo Ferrarezi et al. **Avaliação do consumo de combustível de uma colhedora de cana-de-açúcar em diferentes turnos de trabalho**. XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2012, Londrina, PR, 2012, 4p. Disponível em [http://www.nempa.com.br/skin/default/arquivos/artigos/74/Avaliao\\_do\\_consumo\\_de\\_ombustvel.pdf](http://www.nempa.com.br/skin/default/arquivos/artigos/74/Avaliao_do_consumo_de_ombustvel.pdf) acesso em 28 maio 2015.

GNANSOUNOU, Edgard; DAURIAT, Arnaud. **Ethanol fuel from biomass: a review**.

Journal of Scientific and Industrial Research, Vol 64, november 2005, pp 809-821, Lausanne, Suíça, 2005, 13p. Disponível em [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/5372/1/JSIR%2064\(11\)%20809-821.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/5372/1/JSIR%2064(11)%20809-821.pdf) acesso em 29 junho 2014

GOMES, Jorge Fernando Fávaro. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2003, 75p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-03072003-094123/pt-br.php> acesso em 08 junho 2014

GRUPO WEG. **Catálogo Técnico Mercado Brasileiro: Motor Elétrico Trifásico W22**. Unidade Motores, Grupo WEG, Jaraguá do Sul, SC, 2016a, 52p. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf> acesso em 28 junho 2016.

GRUPO WEG. **Manual Técnico de Motores**. Unidade Motores, Grupo WEG, Jaraguá do Sul, SC, 2016b, 146p. Disponível em [http://www.hd.ind.br/PDF/manual\\_TECNICO-motores.pdf](http://www.hd.ind.br/PDF/manual_TECNICO-motores.pdf) acesso em 28 junho 2016.

GRUPO WEG. **Motores: Aplicações Industriais**. Unidade Motores, Grupo WEG, Jaraguá do Sul, SC, 2016c, 22p. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-aplicacoes-industriais-50009275-catalogo-portugues-br.pdf> acesso em 28 junho 2016.

GRUPO WEG. **Motores: Linhas de Prudutos, Características, Especificações, Instalações, Manutenções**. Unidade Motores, Grupo WEG, Jaraguá do Sul, SC, 2016d, 145p. Disponível em <http://www.coe.ufri.br/~richard/Acionamentos/Catalogo%20de%20Motores.pdf> acesso em 28 junho 2016.

HALL, Charles A. S.; BALOGH, Stephen; MURPHY, David J. R.. **What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?** *Energies* 2009, 2, 25-47; doi:10.3390/en20100025, Program in Environmental Science, State University of New York - College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, NY, USA, 2009, 23p. Disponível em [http://dieoff.com/\\_Energy/WhatIsTheMinumEROI\\_energies-02-](http://dieoff.com/_Energy/WhatIsTheMinumEROI_energies-02-)

[00025.pdf](#) acesso em 02 março 2016.

HALL, Charles A. S.; Hansen, Doug. **New Studies in EROI (Energy Return on Investment)**. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Suíça, 2011, 421p. Disponível em [http://www.esf.edu/efb/hall/New\\_Studies\\_EROI\\_final4.pdf](http://www.esf.edu/efb/hall/New_Studies_EROI_final4.pdf) acesso em 19 fevereiro 2016.

HALL, Charles A. S.; Lambert, Jessica G.; Balogh, Stephen B.. **EROI of different fuels and the implications for society**. Energy Policy 64 (2014) pg 141–152, Elsevier, College of Environmental Science and Forestry, State University of New York, Syracuse, NY, USA, 2014, 12p. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003856> OU [http://ac.els-cdn.com/S0301421513003856/1-s2.0-S0301421513003856-main.pdf?\\_tid=011585fe-e0c5-11e5-819d-00000aab0f27&acdnat=1456957423\\_a78a3581deed29b1684d3e5fe23211c2](http://ac.els-cdn.com/S0301421513003856/1-s2.0-S0301421513003856-main.pdf?_tid=011585fe-e0c5-11e5-819d-00000aab0f27&acdnat=1456957423_a78a3581deed29b1684d3e5fe23211c2) acesso em 02 março 2016.

HASANBEIGI, Ali ; PRICE, Lynn ; ADEN, Nathaniel. **A Comparison of Iron and Steel Production Energy Use and Energy Intensity in China and the U.S.**. China Energy Group, Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 2011, 87p. Disponível em <https://china.lbl.gov/sites/all/files/lbl-4836e-us-china-steeljune-2011.pdf> acesso em 25 março 2016.

IEA - International Energy Agency. **Energy and Climate Change**. OECD/IEA, International Energy Agency, Paris, France, 2015, 200p. Disponível em <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf> acesso em 26 março 2016.

INNOCENTE, Andréia Franco. **Cogeração a partir da Biomassa Residual de Cana-De-Açúcar - Estudo De Caso**. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2011, 124p. Disponível em <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0592.pdf> acesso em 28 março 2016.

IPS - Institute for Prospective Technological Studies. **Energy consumption and CO2**

**emissions from the world iron and steel industry.** IPS - Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Varese, Italy, 2003, 69p Disponível em <http://ftp.jrc.es/EURdoc/eur20686en.pdf> acesso em 25 março 2016.

JANJUA, Rizwan. **Energy Use in the Steel Industry.** World Steel Association, Brussels, Belgium, EU, 2014, 17p. Disponível em [https://www.iea.org/media/workshops/2014/industryreviewworkshopoct/8\\_Session2\\_B\\_WorldSteel\\_231014.pdf](https://www.iea.org/media/workshops/2014/industryreviewworkshopoct/8_Session2_B_WorldSteel_231014.pdf) acesso em 25 março 2016.

KEAY, Malcolm. **Energy: the Long View.** Oxford, United Kingdom, EU, 2007, 34p. Disponível em <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2010/11/SP20-EnergyTheLongView-MalcolmKeay-2007.pdf> acesso em 21 julho 2016.

KOPP, G.; Lean, J.L. **A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance.** Geophys. Res. Letters Frontier article, Vol. 38, L01706, doi:10.1029/2010GL045777, 2011, 5p. Disponível em <http://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/> acesso em 14 outubro 2014.

KORNDÖRFER, Gaspar H.. **Gesso Agrícola.** Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, SP, 2002, 20p. Disponível em [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Gesso\\_agricolaID-NOjhwGHCyk.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Gesso_agricolaID-NOjhwGHCyk.pdf) acesso em 03 junho 2016.

LANGER, Thomas. **Simplified Life Cycle Assessment study of the substitution of 5% of Swiss gasoline by Brazilian bio-ethanol.** Instituto Ekos Brasil, São Paulo, 2006, 53p. Disponível em [http://www.ekosbrasil.org/media/file/Ethanol%20LCA\\_Instituto\\_Ekos\\_Brasil.pdf](http://www.ekosbrasil.org/media/file/Ethanol%20LCA_Instituto_Ekos_Brasil.pdf) acesso em 28 junho 2014

LOBO, Vicente. **O Mercado e o Desafio da Industria de Fertilizantes no Brasil.** Bunge Fertilizantes, São Paulo, SP, 2008, 38p. Disponível em [http://www.ibram.org.br/cbminas/palestras/25\\_11\\_00\\_Vicente%20Lobo.pdf](http://www.ibram.org.br/cbminas/palestras/25_11_00_Vicente%20Lobo.pdf) acesso em 08 julho 2016

LYRA, Gabriel Albuquerque de. **Consumo de Combustível de Duas Colhedoras de Cana-de-Açúcar em Função da Velocidade de Rotação de Motor.** Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2012, 66p. Disponível em <http://www.página.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0817.pdf> acesso em 28 maio 2015.

LUZ, Maria José da Silva; FERREIRA, Gilvan Barbosa; BEZERRA, José Renato Cortez. **Adubação e Correção do Solo: Procedimentos a Serem Adotados em Função dos Resultados da Análise do Solo.** Embrapa, Algodão, MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, Campina Grande, PB, 2002, 32p. Disponível em <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPA/19595/1/CIRTEC63.pdf> acesso em 03 junho 2016.

MACEDO, Felipe Barros. **Eficiência de fertilizantes com nitrogênio e enxofre sobre a composição químico-bromatológica e algumas características agrônomicas da cultura de cana-de-açúcar.** Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, USP, Pirassununga, 2010, 97p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74131/tde-04102010-164023/pt-br.php> acesso em 08 junho 2014

MACEDO, Isaias C.; Seabra, Joaquim E.A. **Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol.** Wageningen University, Wageningen, Holanda, 2009, 17p. Disponível em <http://sugarcane.org/resource-library/studies/Wageningen%20-%20Chapter%204.pdf> acesso em 28 junho 2014.

MACEDO, Isaias C.; SEABRA, Joaquim C.A.; SILVA, João E.A.R. **Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020.** Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2007, 14p. Disponível em [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleListID=-851389824&\\_sort=r&\\_st=13&view=c&md5=c933e24b38cf7a0694f4916fff52b914&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=-851389824&_sort=r&_st=13&view=c&md5=c933e24b38cf7a0694f4916fff52b914&searchtype=a) acesso em 10 abril 2014

MACEDO, Isaias de Carvalho et al. **Balanco das emissões de gases do efeito estufa**

**na produção e uso de etanol no Brasil.** Secretaria do Meio Ambiente, Estado de São Paulo, 2004, 32p. Disponível em <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=11168105> acesso em 16 junho 2014

MACEDO, Isaias de Carvalho. **The sugarcane agroindustry - its contribution to reducing CO2 emission in Brasil.** Centro de Tecnologia Copersucar, Piracicaba, SP, 1992, 14p. Disponível em [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwixrezTsbntAhWHvZAKHc9bB50QFghDMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2F096195349290043P&usg=AFQjCNF49Low-56fG9273YNsc\\_tynm4mKg](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwixrezTsbntAhWHvZAKHc9bB50QFghDMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2F096195349290043P&usg=AFQjCNF49Low-56fG9273YNsc_tynm4mKg) acesso em 08 março 2017

MACHADO, Simone Silva. **Tecnologia de Fabricação do Açúcar.** Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, Ministério da Educação, Inhumas, GO, 2012, 56p. Disponível em [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico\\_acucar\\_alcool/tecnologia\\_fabricacao\\_acucar.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico_acucar_alcool/tecnologia_fabricacao_acucar.pdf) acesso em 21 outubro 2016

MANTOAM, Edemilson José. **Incorporação da energia na vida útil de uma colhedora autopropelida de cana-de-açúcar.** ESALQ, USP, Piracicaba, 2011, 94p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/index.php?option=com\\_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br](http://www.teses.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br) acesso em 16 maio 2015

MARCOCCIA, Renato. **A Participação do Etanol Brasileiro em uma Nova Perspectiva na Matriz Energética Mundial.** PIPGE - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, USP, São Paulo, SP, 2007, 95p. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-05072007-114536/publico/Etanol2007Renato.pdf> acesso em 24 julho 2016.

MARQUES, Francisco José Albuquerque; FARIAS, Vera Núbia Carvalho de.; SOUZA, Victor Cantalice de.; Pedrosa, Valmir de Albuquerque. **Estudo da Viabilidade Econômica da Implantação e Operação de uma Adutora de Vinhaça.** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS, 2009, 17p. Disponível

em <http://www.ctec.ufal.br/professor/vap/ArtigoABRH2009Vinhaca.pdf> acesso em 16 junho 2016.

MEDEIROS, Lindoiri Flávia Santana de. **Avaliação da energia contida nos principais sistemas agrícolas e industriais da região médio norte do Estado de Mato Grosso**. Programa de Pós-Graduação de Agronegócios e Desenvolvimento Regional, Faculdade de Economia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2011, 149p. Disponível em [http://www.ufmt.br/ufmt/site/userfiles/file/adr/Disserta%C3%A7%C3%B5es/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_LindoiriFl%C3%A1via.pdf](http://www.ufmt.br/ufmt/site/userfiles/file/adr/Disserta%C3%A7%C3%B5es/Disserta%C3%A7%C3%A3o_LindoiriFl%C3%A1via.pdf) acesso em 13 outubro 2015.

MELLO, Arthur Miola de. **Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento de palhico**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2009, 89p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/index.php?option=com\\_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br](http://www.teses.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br) acesso em 16 maio 2015.

MENDES JÚNIOR, Antonio Aparecido. **Participação da Energia Fóssil na Produção dos Fertilizantes Industriais Nitrogenados com Ênfase na Uréia**. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2011, 52p. Disponível em <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0728.pdf> acesso em 01 junho 2016.

MENEGUETTI, Claudio Cezar; MEZARROBA, Silvana; GROFF, Andréa Machado. **Fatores relacionados ao cultivo da cana-de-açúcar**. Fecilcam, Campos Mourão, PR, 2010, 7p. Disponível em [http://www.fecilcam.br/anais\\_iveepa/arquivos/9/9-03.pdf](http://www.fecilcam.br/anais_iveepa/arquivos/9/9-03.pdf) acesso em 08 junho 2014

MILANEZ, Artur Yabe et al. **Logística para o etanol: situação atual e desafios futuros**. BNDES Setorial 31, p. 49-98, BNDES, Brasília, DF, 2010, 50p. Disponível em [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/onhecimento/bnset/set3102.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/onhecimento/bnset/set3102.pdf) acesso em 27 outubro 2016

MUTTON, Márcia Justino Rossini et al. **Qualidade Tecnológica do Melaço Produzido com Cana-de-Açúcar Bisada**. V Semana de Tecnologia do Curso de Biocombustíveis da Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal, FCAV/UNESP -

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Jaboticabal, SP, 2012, 4p. Disponível em <http://www.citec.fatecjab.edu.br/index.php/files/article/download/70/pdf> acesso em 28 outubro 2016

NEVES, Marcos Fava; TROMBIN, Vinicius Gustavo. **A Dimensão do Setor Sucroenergético: mapeamento e quantificação da safra 2013/2014**. Markestrat, Fundace, FEA-RP/USP, Ribeirão Preto, 2014, 45p. Disponível em [http://www.brasilagro.com.br/imagens/pdf/Mapeamento\\_Quantificacao\\_Setor\\_Sucroenergetico\\_Safra\\_2013-14.pdf](http://www.brasilagro.com.br/imagens/pdf/Mapeamento_Quantificacao_Setor_Sucroenergetico_Safra_2013-14.pdf) E [http://cdn2.hubspot.net/hub/402341/file-1939459807-pdf/id-markestrat/publicacoes/pub\\_20140611090607\\_mapeamento\\_quantificacao\\_safra2013-14\(1\).pdf?t=1441973305701](http://cdn2.hubspot.net/hub/402341/file-1939459807-pdf/id-markestrat/publicacoes/pub_20140611090607_mapeamento_quantificacao_safra2013-14(1).pdf?t=1441973305701) E <http://www.markestrat.org/publicacoes/a-dimens%C3%A3o-do-setor-sucroenerg%C3%A9tico-mapeamento-e-quantifica%C3%A7%C3%A3o-da-safra-2013/14> acesso em 28 junho 2014

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: Energia para o Desenvolvimento**. BNDES/CGEE, Brasil, 2008, 316p. Disponível em <http://www.bioetanoldecana.org/pt/download/bioetanol.pdf> acesso em 29 junho 2014 inativo em 12 setembro 2015 Google ainda achou link válido

ODUM, Eugene P.; Barrett, Gary W. **Fundamentos de Ecologia**. Cengage Learning Edições Ltda, São Paulo, 2007, 612p.

ODUM, Howard T. **Emergy Accounting**. Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, 2000b, 20p. Disponível em <http://dieoff.org/page232.pdf> acesso em 24 novembro 2015.

ODUM, Howard T. **Environmental Accounting: emergy and environmental decision making**. John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1996, 12p. Disponível em <http://dieoff.com/emergy.pdf> acesso em 10 outubro 2015.

ODUM, Howard T.; Brown, Mark T.; Brandt-Williams, Sherry. **Handbook of Emergy Evaluation: Introduction and Global Budget**. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, 2000a, 17p. Disponível em [http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/documents/folios/Folio\\_01.pdf](http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/documents/folios/Folio_01.pdf) acesso em 18



novembro 2015.

OLIVEIRA, Alexandre Campelo de. **Interação da adubação nitrogenada e molíbdica em cana-de-açúcar.** Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012a, 97p. Disponível em <http://ufrpe.br/páginas/portal/files/teses/2012/Alexandre%20Campelo%20de%20Oliveira.pdf> acesso em 08 junho 2014

OLIVEIRA, Carlos Alexandre de. **Cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar: histórico, situação atual e perspectivas para o setor.** Pós-graduação em Gestão do Setor Sucroenergético – MTA, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Sertãozinho, SP, 2013, 64p. Disponível em <http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-iii-c/trabalhos/cogerao-a-partir-do-bagaco-da-cana-de-acucar-historico-situacao-atual-e-perspectivas-para-o-setor> acesso em 23 abril 2014.

OLIVEIRA, Cilene. **Plantio mecanizado de cana-de-açúcar: aspectos operacionais e econômicos.** ESALQ, USP, Piracicaba, 2012b, 108p. Disponível em <http://www.theses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-03122012-111153/en.php> acesso em 25 abril 2014.

OLIVEIRA, Lucas Mendes; SERRA, Juan Carlos Valdés; OLIVEIRA, Karine Beraldo Magalhães. **Balances Energéticos da Produção de Etanol para Diferentes Matérias Primas.** Revista Geoambiente Online, N° 22 - janeiro-junho 2014 pg 39 - 52, Curso de Geografia, UFG - Universidade Federal de Goiás, Jataí, GO, 2014a, 14p. Disponível em <https://revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/32268/17227> acesso em 27 junho 2016.

OLIVEIRA, Marcelo E. Dias de; VAUGHAN, Burton E. ; RYKIEL JR, Edward J.. **Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint.** BioScience, July 2005 Vol 55 Number 7 pg 594-602, 2005, 10p. Disponível em <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/55/7/593.full.pdf+html> acesso em 22 junho 2016.

OLIVEIRA, Marli Dias Mascarenhas. **Custo Operacional e Ponto de Renovação de Tratores Agrícolas de Pneus: Avaliação de uma Frota.** Faculdade de Agronomia, ESALQ, USP, Piracicaba, 2000, 148p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-11032002-112718/publico/MarliDias.pdf> acesso em 02 março 2016.

OLIVEIRA, Milton Pyles de. **Dimensionamento operacional e econômico de um sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar: um estudo de caso.** ESALQ, USP, Piracicaba, 2012c, 81p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-05112012-102140/publico/Milton\\_Pyles\\_de\\_Oliveira\\_versao\\_revisada.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-05112012-102140/publico/Milton_Pyles_de_Oliveira_versao_revisada.pdf) acesso em 08 junho 2014

OLIVEIRA, Stella Fernanda de Aquino. **Avaliação Energética da Biomassa do Bagaço de cana-de-açúcar em Diferentes Indústrias Sucroenergéticas.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronautica, São José dos Campos, SP, 2014b, 81p. Disponível em [http://www.fcmmep.org.br/site/sites/default/files/dissertacoes/turma1/Stella\\_DP-075\\_2014.pdf](http://www.fcmmep.org.br/site/sites/default/files/dissertacoes/turma1/Stella_DP-075_2014.pdf) acesso em 23 maio 2016.

OVERMAN, David L. **External Combustion Engine Technology (Vapor and Liquid Cycles) for Individual Soldier Systems.** U.S. Army Laboratory Command, Harry Diamond Laboratories, Adelphi, MD, USA, 1992, 93p. Disponível em <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a252754.pdf> acesso em 10 outubro 2017

PALACIOS, Luis de la Torre. **Natural Resources Sustainability: Iron Ore Mining.** Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, 2011, 8p. Disponível em <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n170/a27v78n170.pdf> acesso em 14 fevereiro 2016.

PECEGE. **Custos de Produção de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol no Brasil: Acompanhamento da Safra 2011/2012 - Centro-Sul.** Departamento de Economia, Administração e Sociologia, ESALQ, USP, 2012, 58p. Disponível em [http://canaldoprodutor.com.br/sites/default/files/relatorio\\_Custos\\_Prod\\_Cana\\_2011\\_12.pdf](http://canaldoprodutor.com.br/sites/default/files/relatorio_Custos_Prod_Cana_2011_12.pdf) acesso em 26 abril 2015.

PERDONÁ, Rogério C. **Aproveitamento Energético de Resíduos e Biomassa.** Odebrecht Agroindustrial, São Paulo, 2013, 30p. Disponível em [http://www.crq4.org.br/sms/files/file/aproveitamento\\_biomassa\\_perdona\\_odebrecht.pdf](http://www.crq4.org.br/sms/files/file/aproveitamento_biomassa_perdona_odebrecht.pdf) acesso em 21 janeiro 2016.

PFEIFFER, Dale Allen. **Eating Fossil Fuels.** Organic Consumers Association, Filand, MN, USA, 2004, 10p. Disponível em [https://www.organicconsumers.org/old\\_articles/corp/fossil-fuels.php](https://www.organicconsumers.org/old_articles/corp/fossil-fuels.php) acesso em 02 janeiro 2017

PINHO, Eduardo Henrique Braga de. **Estudo de Ampliação de Extração de Vapor e de Aumento de Eficiência Energética de uma Termelétrica.** Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014, 63p. Disponível em <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009951.pdf> acesso em 02 novembro 2016

PINTO, Francisco de Assis de Carvalho. **Preparação de solo.** Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2002, 65p. Disponível em [http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT155\\_maquinas\\_agricolas/Preparo\\_Solo.ppt](http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT155_maquinas_agricolas/Preparo_Solo.ppt) OU <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/> acesso em 15 novembro 2015.

PITA, Paulo Valério Varela. **Valorização Agrícola de Cinza da Co-Combustão de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Biomassa Lenhosa.** Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009, 120p. Disponível em <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/1984/1/Tese%20de%20Mestrado%2011%20Jan.pdf> acesso em 08 junho 2014

POPPE, Marcelo Khaled; Perico, Ana Carolina Silveira. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, DF, 2009, 538p. Disponível em [https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/5Bioetanol+de+Cana+de+A%C3%A7ucar+2009\\_6407.pdf](https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/5Bioetanol+de+Cana+de+A%C3%A7ucar+2009_6407.pdf) acesso em 18 março 2016.

PRICE, Lynn; PHYLIPSEN, Dian; WORRELL, Ernst. **Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Sector in Key Developing Countries**. Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 2001, 32p. Disponível em <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/783473/> acesso em 24 abril 2016.

PRINCENTON UNIVERSITY. Princeton University Press, Chapter one, provavelmente 2010, 16p. Disponível em <http://press.princeton.edu/chapters/s10138.pdf> acesso em 27 setembro 2016

RILEY, Paul H.. **The Myth of the High-Efficiency External-Combustion Stirling Engine**. Engineering, 2015, 7, 789-795, Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Nottingham, Nottingham, UK, 2015, 7p. Disponível em 2049. [https://file.scirp.org/pdf/ENG\\_2015121717392471.pdf](https://file.scirp.org/pdf/ENG_2015121717392471.pdf) acesso em 10 novembro 2017.

RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2002, 111p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/index.php?option=com\\_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br](http://www.teses.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=18&Itemid=85&lang=pt-br) acesso em 16 maio 2015.

RODRIGUES, Bruna Rocha. **Estoques Reguladores de Etanol Combustível Frente à Introdução dos Veículos Flex Fuel na Frota Nacional**. COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2012, 122p. Disponível em [http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/bruna\\_rodrigues.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/bruna_rodrigues.pdf) acesso em 24 julho 2016

ROLIM, Milton Matos; Fraidenraich, Naum; Vilela, Olga de Castro. **Energia Solar na Produção de Gesso - Renovando Definições**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012, São Paulo, SP, 2012, 6p. Disponível em <https://araripesolarsustentavel.files.wordpress.com/2012/07/262revisado1.pdf> acesso em 03 junho 2016.

ROQUETTE FILHO, David. **Potencial de Produção de Grãos Brasileiros Via Fertilização e Impactos nas Emissões de CO<sub>2</sub>eq**. Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP, 2014, 200p. Disponível em [http://anda.org.br/multimedia/DISSERTACAO\\_David\\_Roquetti\\_Filho\\_FGV\\_2012\\_2014\\_03.04.2014.pdf](http://anda.org.br/multimedia/DISSERTACAO_David_Roquetti_Filho_FGV_2012_2014_03.04.2014.pdf) acesso em 28 julho 2016

ROSSETTO, Raffaella; DIAS, Fábio Luis Ferreira. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões**. Centro de Cana do Instituto Agrônomo (IAC/Apta/SAA), Pólo Regional Centro-Sul, Piracicaba, SP, 2005, 6p. Disponível em [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/AD1D0D574326386683257AA1006BC3D8/\\$FILE/Enc6-11-110.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/AD1D0D574326386683257AA1006BC3D8/$FILE/Enc6-11-110.pdf) acesso em 25 abril 2014.

SALLA, Diones Assis; FURLANETO, Fernanda de Paiva Badiz; CABELLO, Claudio; KANTHACK, Ricardo Augusto Dias. **Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar**. Ciência Rural, Santa Maria, v.39, n.8, p.2516-2520, nov, 2009, 5p. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n8/a307cr1202.pdf> acesso em 16 maio 2016.

SANTA IZABEL IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. **Manual de Instruções GILSI e SANTA IZABEL IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. Manual de Instruções GILSI e GAISI** . Santa Izabel Implementos Agrícolas Ltda, São João da Boa Vista, SP, 2010, 13p. Disponível em [http://www.santaizabel.ind.br/pdf\\_produtos/MANUAL-DE-INSTRUCAO-GILSI-grade-intermediaria-santa-izabel-GAISI-grade-aradora-intermediaria-santa-izabel-NOVO.pdf](http://www.santaizabel.ind.br/pdf_produtos/MANUAL-DE-INSTRUCAO-GILSI-grade-intermediaria-santa-izabel-GAISI-grade-aradora-intermediaria-santa-izabel-NOVO.pdf) acesso em 09 outubro 2016

SANTOS, Denivaldo Teixeira. **Análise do Ciclo de Vida dos Produtos Açúcar & Álcool em Usinas Sucroalcooleira no Estado de Mato Grosso do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 2009, 142p.

Disponível em

<https://sistemas.ufms.br/sigpos/portal/trabalhos/download/364/cursoId:33> acesso em 29 junho 2014

SANTOS, Neisvaldo Barbosa dos. **Identificação dos fatores críticos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2011, 86p. Disponível em [http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-19102011-090951/publico/Neisvaldo\\_Barbosa\\_dos\\_Santos.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-19102011-090951/publico/Neisvaldo_Barbosa_dos_Santos.pdf) acesso em 08 junho 2014

SAYGIN, Deger et al. **Chemical and Petrochemical Sector: Potential of best practice technology and other measures for improving energy efficiency**. IEA - International Energy Agency, Paris, França, 2009, 60p. Disponível em [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/chemical\\_petrochemical\\_sector.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/chemical_petrochemical_sector.pdf) acesso em 20 fevereiro 2016.

SCHMIDT JUNIOR, João Conrado. **Avaliação de desempenho efetivo de colhedora de cana-de-açúcar**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2011, 110p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-23112011-094646/pt-br.php> acesso em 08 junho 2014

SEABRA, Joaquim Eugênio Abel. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 2008, 298p. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000446190> acesso em 06 setembro 2014

SILVA, Cinthia Rubio Urbano de. **Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-açúcar no Brasil**. Unicamp, Campinas, 2013, 193p. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000914277&fd=y> acesso em 29 junho 2014

SILVA, Marcelo Bacci da; MORAIS, Anderson dos Santos. **Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação.**

XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008a, 9p. Disponível em

[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008\\_tn\\_stp\\_077\\_543\\_11289.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_tn_stp_077_543_11289.pdf) acesso em 06 maio 2016

SIMS, Ralph E.H.; SCHOCK, Robert N.. **IPCC: Energy Flow.** IPCC, UNEP/WMO, Genebra, Suíça, 2006, 72p. Disponível em <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf>

acesso em 26 março 2016.

SMIL, Vaclav. **Science, Energy, Ethics, And Civilization.** Cambridge University Press, 2010, 21p. Disponível em <http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-articles-science-energy-ethics-civilization.pdf>

acesso em 21 julho 2016.

SOARES, Luís Henrique de Barros Soares. **Mitigação das emissões de Gases Efeito Estufa pelo uso de etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil.** Embrapa

Agrobiologia, Seropédica, RJ, 2009, 18p. Disponível em

<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/630482/1/cit027.pdf> acesso em 16 junho 2014

SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources.** Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA, 2001, 139p. Disponível em

[http://www.spe.org/industry/docs/GuidelinesEvaluationReservesResources\\_2001.pdf](http://www.spe.org/industry/docs/GuidelinesEvaluationReservesResources_2001.pdf) acesso em 19 setembro 2017

SOUZA, Glaucia Mendes et al. **Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps.**

Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), Paris, France, 2015, 779p. Disponível em

[http://bioenfapesp.org/scopebioenergy/images/chapters/bioenergy\\_sustainability\\_scope.pdf](http://bioenfapesp.org/scopebioenergy/images/chapters/bioenergy_sustainability_scope.pdf) acesso em 30 agosto 2015.

SOUZA, Simone Pereira de. **Produção Integrada de Biocombustíveis: Uma Proposta para Reduzir o Uso de Combustível Fóssil no Ciclo de Vida do Etanol de Cana de Açúcar**. EESC, USP, São Carlos, SP, 2010, 144p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-12082010-140053/pt-br.php> acesso em 29 junho 2014

SPADOTTO, Angélica Fernanda. **Desenvolvimento de Programa Computacional Aplicado ao Empacotamento do Palhiço de Cana-de-Açúcar**. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”, Botucatu, 2008, 62p. Disponível em <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0313.pdf> acesso em 30 janeiro 2016.

SULLIVAN, J.L.; BURNHAM, A.; WANG, M.. **Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing**. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Illinois, USA, 2010, 47p. Disponível em [https://greet.es.anl.gov/files/vehicle\\_and\\_components\\_manufacturing](https://greet.es.anl.gov/files/vehicle_and_components_manufacturing) OU [https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi01Z7s9tbMAhVKgJAKHcQeCK0QFgghMAA&url=https%3A%2F%2Fgreet.es.anl.gov%2Ffiles%2Fvehicle\\_and\\_components\\_manufacturing&usq=AFOjCNEYz6OyVaH6eaEXiOupFDxIbaAidQ&bvm=bv.122129774,d.Y2I](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi01Z7s9tbMAhVKgJAKHcQeCK0QFgghMAA&url=https%3A%2F%2Fgreet.es.anl.gov%2Ffiles%2Fvehicle_and_components_manufacturing&usq=AFOjCNEYz6OyVaH6eaEXiOupFDxIbaAidQ&bvm=bv.122129774,d.Y2I) acesso em 13 maio 2016.

**The Automotive Industry Environmental Issues**. 2012, 35p. Disponível em <http://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/courses/engs171/auto.pdf> acesso em 13 maio 2016

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. EPE, Rio de Janeiro, RJ, 2016, 417p. Disponível em <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%202013maio2016.pdf> acesso em 02 agosto 2016.



TONON FILHO, Renato José. **Modelagem e simulação em plantas de etanol: uma abordagem técnico-econômica**. DEQ, Ufscar, São Carlos, 2013, 94p. Disponível em [http://www.bdt.d.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=6734](http://www.bdt.d.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=6734) acesso em 02 abril 2014

TORREZAN, Hamilton Fernando. **Enleiramento e Enfardamento Prismático de Palhão de Cana-de-Açúcar: Alguns Parâmetros de Desempenho Operacional e Eficiência Energética**. ESALQ, USP, Piracicaba, 2003, 106p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-22102003-171125/publico/hamilton.pdf> acesso em 30 janeiro 2016.

TRENBERTH, Kevin E.; Kiehl, J. T. **Earth's Annual Global Mean Energia Budget. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 78, No. 2, February 1997**. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, 1997, Disponível em [http://climateknowledge.org/figures/Rood\\_Climate\\_Change\\_AOSS480\\_Documents/Kiehl\\_Trenberth\\_Radiative\\_Balance\\_BAMS\\_1997.pdf](http://climateknowledge.org/figures/Rood_Climate_Change_AOSS480_Documents/Kiehl_Trenberth_Radiative_Balance_BAMS_1997.pdf) acesso em 08 outubro 2015.

U.S. EIA - Energy Information Administration. **Monthly Energy Review February 2016**. EIA - U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Statistics, DOE - U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2016, 235p. Disponível em <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/mer.pdf> acesso em 26 março 2016.

UNITED NATIONS. **Our Common Future**. General Assembly, United Nations, Forty Second Session, New York, NY, USA, 1987, 300p. Disponível em <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> acesso em 18 novembro 2016

VIOLANTE, Mauro Henrique Salgueiro Rodrigues. **Potencial de produção de cana-energia em áreas agrícolas marginais no Brasil**. Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP, 2012, 112p. Disponível em [http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/10222/Dissertacao\\_Mauro%20Violante.pdf?sequence=3](http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/10222/Dissertacao_Mauro%20Violante.pdf?sequence=3) acesso em 23 abril 2014.

VITTI, Godofredo Cesar et al. **Nutrição e Adubação de cana-de-açúcar**. AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica, Embrapa, Brasília, 2005, 78p.

Disponível em

[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Nutricao+cana+GVitti\\_000fh3r3vzp02wyiv80rn0etnmc6zamd.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Nutricao+cana+GVitti_000fh3r3vzp02wyiv80rn0etnmc6zamd.pdf) acesso em 24 abril 2014.

VITTI, Godofredo Cesar. **Correção do Solo e Adubação da Cana-de-Açúcar**.

COPLANA, Piracicaba, SP, 2013, 284p. Disponível em

<http://www.cana.com.br/biblioteca%5CPalestra%20Coplacana%20FINAL.pdf> acesso em 25 abril 2014.

VITTI, Godofredo Cesar; Luz, Pedro Henrique de Cerqueira. **Nutrição e Adubação de cana-de-aúcar**. Departamento de Ciências do Solo, ESALQ, USP, 2009, 121p.

Disponível em <http://www.cetem.gov.br/agrominerais/livros/CanaAcucar.pdf> acesso em 25 abril 2014.

WALTER, Arnaldo et al. **Biocombustível Brasileiro: uma análise de**

**sustentabilidade**. DEFRA - Department for Environment Food and Rural Affairs, British Embassy, Brasília, 2008, 178p. Disponível em

[https://www.google.com.br/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj6PKo\\_aXLAhWEWx4KHeOYDGYQFggpMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.unica.com.br%2Fdownload.php%3FidSecao%3D17%26id%3D6548848&usg=AFQjCNGojTU2PpsKyux7nwPpLcA&bvm=bv.115339255,d.dmo](https://www.google.com.br/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj6PKo_aXLAhWEWx4KHeOYDGYQFggpMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.unica.com.br%2Fdownload.php%3FidSecao%3D17%26id%3D6548848&usg=AFQjCNGojTU2PpsKyux7nwPpLcA&bvm=bv.115339255,d.dmo)  
OU <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=6548848> acesso em 02 março 2016.

WANG, Michael et al. **Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use**. Systems

Assessment Group, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, IL 60439, USA, 2012, 14p. Disponível em

[http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/4/045905/pdf/1748-9326\\_7\\_4\\_045905.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/4/045905/pdf/1748-9326_7_4_045905.pdf) acesso em 28 junho 2014.

WEC - World Energy Council. **World Energy Resources - 2013 Survey**. World Energy Council, London, England, EU, 2013, 468p. Disponível em [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf) acesso em 21 julho 2016.

WIDMER, João Alexandre. **Veículos e suas Características**. Escola de Engenharia de S. Carlos, USP, São Carlos, SP, 2003, 34p. Disponível em <http://www.stt.eesc.usp.br/index.php/material-didatico/category/30-stt-0408-fund-eng-transportes?download=84:caracteristicas-de-veiculos> acesso em 08 setembro 2016

WIRTH, Clifford J.. **Peak Oil: alternatives, renewables, and impacts**. Produzido pelo autor e pela organização Peakoilassociates.com, 2008, 48p. Disponível em [http://alternativeenergy.procon.org/sourcefiles/PeakOilAnalysis\\_Wirth.pdf](http://alternativeenergy.procon.org/sourcefiles/PeakOilAnalysis_Wirth.pdf) acesso em 13 julho 2016

WORRELL, Ernst et al. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry**. Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 2010, 160p. Disponível em [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron\\_Steel\\_Guide.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron_Steel_Guide.pdf) acesso em 01 setembro 2015.

WORRELL, Ernst et al. **World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors**. Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 2008, 51p. Disponível em [https://eaei.lbl.gov/sites/all/files/industrial\\_best\\_practice\\_en.pdf](https://eaei.lbl.gov/sites/all/files/industrial_best_practice_en.pdf) acesso em 25 março 2016.

WORRELL, Ernst; Phylipsen, Dian; Einstein, Dan; Martin, Nathan. **Energy Use and Energy Intensity of the U.S. Chemical Industry**. Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, 2000, 40p. Disponível em [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/industrial\\_LBNL-44314.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/industrial_LBNL-44314.pdf) acesso em 24 abril 2016.

ZAMPIERI, Marcelo. **Avaliação Termodinâmica da Produção de Eletricidade e Etanol a partir da Cana-de-Açúcar**. NEST - Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005, 185p. Disponível em <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0030581.pdf> acesso em 04 maio 2016.

ZUURBIER, Peter; VOOREN, Jos van de. **Sugarcane ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 2008, 252p. // os nomes são de editores, não autores// usar cada capítulo e citar autores de cada capítulo na referência bibliográfica. Disponível em <http://sugarcane.org/resource-library/studies/Wageningen.pdf> acesso em 13 fevereiro 2014

ZVI, Yehonatan Ben. **VMA - vehicle assembly and manufacturing: The Energy Cost of Making an Automobile**. Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, 2015, 21p. Disponível em [https://www.weizmann.ac.il/AERI/sites/AERI/files/2015\\_course\\_vehicle\\_manuf\\_and\\_assembly\\_.pptx](https://www.weizmann.ac.il/AERI/sites/AERI/files/2015_course_vehicle_manuf_and_assembly_.pptx) acesso em 13 maio 2016.

## 7 APÊNDICES

O objetivo destes apêndices é fornecer material complementar para a leitura e entendimento da Dissertação. No texto principal, é relatado o mínimo suficiente para acompanhamento dos resultados e discussão das conclusões. Se o leitor ou leitora deseja entender detalhadamente como foram calculados os resultados, se deseja comprovar a reprodutibilidade, se deseja testar novas hipóteses ou cenários, estes apêndices descrevem detalhes dos dados usados, métodos de cálculos usados para as variáveis e resultados, descrições e detalhamentos técnicos de equipamentos, referências bibliográficas de dados primários, e outros dados necessários para embasar a alocação de energia direta e indireta.

Os dados primários relatados nos Apêndices não são exatos, variações de 10% a 25% são “normais”. Não porque os dados sejam imprecisos, mas como lidam com produtos e insumos que tem larga variação de pesos e consumos conforme cada fabricante e seus projetos específicos de engenharia.

Consumo de combustível, manutenção e vida útil variam muito conforme o operador, condições do terreno, condições de tráfego, e estado de conservação dos veículos autopropelidos. O dado usado é uma média razoável.

Os pesos e taras de caminhão, cavalo mecânico, implementos rodoviários, varia também conforme o projeto do fornecedor. Variações de duas toneladas em uma tara de 13 a 15 toneladas é normal. Depende do tipo de aço do fornecedor, tipo de reforço do chassi, do tipo de suspensor do trucado ou do eixo tandem, e de acessórios como manômetros, quebra-ondas, bocais, encarroçamento e dutos de descarga rápida. A tara de cavalo mecânico pode variar mais de duas toneladas conforme fabricante, potência do motor, modelo e ano de fabricação. Peso dos motores tendem a diminuir, peso do chassi e câmbio tende a aumentar com o tempo.

O peso dos implementos agrícolas varia muito, de algumas centenas de quilogramas até várias toneladas. Varia muito conforme a largura do implemento, se é para solo profundo ou para atividade quase superficial, se é de rodas ou se é de arrasto. Os pesos dos tratores e colheitadeiras varia ainda mais, depende muito da potência, se é de pneus ou de esteira, e dos acessórios complementares. Colheitadeiras é um caso especial, a variação pode ser muito maior, podendo variar de menos de 15 toneladas até mais de 22 toneladas. Além de motores de alta potência, com mais de 300HP até 400HP, tem muitas opções de acessórios que podem ser combinados na máquina base. Complementos como pré-cortadores, alinhadores frontais, cortadores de toletes, limpeza de folhas, pré-limpeza mecânica dos colmos, alinhadores de colmos e toletes, etc.

Qualquer dado primário pode ter variações acima de 10%, possivelmente 20% para cada valor. Na literatura, temos variações bem maiores de autor para autor. Justamente por isso, os resultados, parciais e finais, além dos dados secundários, são médias, não valores absolutos com baixa dispersão. EROI final deve ser usado com cautela como valor absoluto. Como valor relativo, está muito menor que os EROI relatados por outros autores, por usar uma metodologia de cálculo mais completo e com fronteira muito maior que a fronteira adotada por outros autores.

Nota relevante é que os resultados parciais e EROI final com certeza está subestimado, pois não são publicados dados detalhados para cálculo de energia total da mineração, do transporte transcontinental, do transporte ferroviário, e de uma infinidade de outros produtos e serviços necessários para a cadeia produtiva completa de EIG.

A metodologia pode ser usada para um estudo de caso específico, por exemplo, uma combinação específica de uma fazenda e uma usina, com dados reais. De

equipamentos, implementos, consumos, uso de insumos, rendimentos reais da usina, em um ciclo completo de 6 anos. A incerteza sobre energia indireta de adubos agrícolas e alguns produtos industriais continua, mas diminui a incerteza total do EROI final.

O ciclo de 6 anos foi adotado para padronização de resultados e comparabilidade com outros autores sobre o tema. O ciclo real é pouco menos que 6 anos, um ciclo quebrado pois varia com subespécie do cultivar, clima passado recente, manejo anterior, rotação de glebas de uma fazenda. Agricultura é uma atividade de risco, que é planejado mas depende muito mais do ambiente natural que de planejamento prévio.

Outra influência de variabilidade é a plantação de leguminosas ou outra “safrinha” de meio ano, para aproveitar o terreno entre um ciclo completo e outro da cana. Ou para ajudar na nitrogação do solo com resíduos agrícolas apropriados, ou para aumentar a rentabilidade financeira do terreno. Este uso afeta a fertilidade do solo e portanto a produtividade do novo plantio de cana, mas não há documentação precisa e correlação sobre o consumo subsequente de insumos e produtividade obtida.

Os vários apêndices não tem uma sequência lógica, cada um é uma seção independente, relacionado a um aspecto fundamental para esta Dissertação. São considerados material de referência, para serem consultados para algum detalhe, sem fazer parte de alguma sequência de leitura.

## 7.1 A1 - Dados Primários

Os dados primários são documentados a seguir, com classe, subclasse e dado, junto com uma sucinta descrição do dado e suas fontes, além de eventuais observações. Nem todos os dados primários são usados nos cálculos. Foram incluídos porque a metodologia usada necessitava dos dados primários em algumas referências muito citadas, para reprodução dos valores calculados por outros autores.

Cada dado primário é descrito com Classe, Subclasse, e o nome do Parâmetro. Cada Parâmetro pode ter valor máximo, valor mínimo, e obrigatoriamente um valor adotado para uso.

**Prim; Ambiental; Emery solo erodido** : emery necessário para repor o solo erodido anualmente em um hectare de plantação de cana. baseado nos dados de Odum (1996) e Odum (2006) . Nestas referências, considera como solo fértil apenas 0,45 metros e prazo de formação de apenas 500 anos. A perda anual de solo por erosão varia de 12ton/ha (ZUURBIER, 2008) a 19ton/ha (SANTOS, 2009) a 12,4ton/ha (POPPE, 2009). Usando o valor primário de 12 toneladas por hectare por ano como o dado mais otimista, e o valor de  $1,0 \times 10^9$  seJ/g para emery do solo, temos que alocar pelo menos  $1,7360 \times 10^{10}$  MJ/ha para cada colheita de cana. Este valor não foi contabilizado no balanço energético, é um problema que se tornará agudo bem depois que terminar a energia fóssil.

**Prim; Ambiental; Erosão solo** : Erosão solo: massa de solo perdido por erosão, já rateado por colheita, unidades em toneladas por hectare. Valor adotado é a média aritmética entre o máximo e o mínimo relatado pela literatura, variando entre 12,0 19,0 e 12,4 toneladas de solo por hectare por colheita, ou aproximadamente 0,4mm de solo. Valor adotado: 14,467ton/ha/colheita. (ODUM, 1996; ZUURBIER, 2008; SANTOS, 2009; POPPE, 2009)

**Prim; Ambiental; TSI Solar espaço** : valor adotado 1.361W/m<sup>2</sup> (KOPP, 2011). Este é um valor médio, varia ligeiramente com atividade solar, com distância variável entre Terra e Sol (órbita elíptica, não circular). Sites como NASA e NOAA tem muitas informações sobre medições e médias históricas. A radiação que atinge o solo é bem menor, conforme detalhado no texto, além das perdas por latitude e por cobertura de nuvens.

**Prim; Ambiental; TSI Solar solo sem cobertura nuvens** : adotando os valores usuais derivados de livros sobre Ecologia e Meteorologia, usando os dados experimentais de absorção atmosférica, difração, e outras perdas, apenas aproximadamente 173,5W/m<sup>2</sup> é energia útil que chega ao solo. E dessa energia, apenas uma fração é energia fotosintética, isto é, só dentro de uma estreita faixa de comprimento de onda é que o foton tem a energia correta para ser aproveitada para produção de biomassa, seja por plantas, seja por fitoplanctons, seja por zooplanctons. Valor adotado: 173,53W/m<sup>2</sup>. Desprezando os efeitos de precessão da Terra nos dias do ano que não sejam equinócios, temos que corrigir a radiação real no solo pelo coseno da latitude, na forma  $TSI_{real} = TSI_{equador} * \cos(\text{latitude})$ . Esta adequação é uma aproximação, mas é aceitável pois também não estamos levando em conta a cobertura de nuvens e as perdas devido à chuva. Experiência prática das fazendas mostram que a radiação solar é mais que suficiente em qualquer latitude no Brasil, e o clima geral, com alternância de invernos temperados e épocas chuvosas tem mais influência na produtividade tanto em biomassa como em açúcares no caldo, além do tipo de solo (tem que ser mais siltoso e argiloso que arenoso) além do relevo do solo. Por isso a produtividade na região central e sul do Brasil é bem maior que a produtividade no norte e nordeste, normalmente com 50% ou mais a favor das plantações do sul/centro oeste. (CONAB, 2016a)

**Prim; Cana; exportação Ca** : quantidade de calcio por tonelada de colmo e ponteiros. Apenas um indicador para verificação de consistência de dados sobre uso de adubos. Valor adotado 0,87kg/ton cana (colmo + ponteiros). Valor mínimo da literatura é de 0,60kg/ton cana. Deve ser lembrado que os valores de composição de biomassa variam muito com cultivar (subespécie de cana), solo, clima, manejo, etc. (VITTI, 2005; VITTI, 2013). Serve como parâmetro mínimo de necessidade de macronutrientes.

**Prim; Cana; exportação K** : macronutriente indispensável, é usado em grandes quantidades, e a maior parte fica na vinhaça remanescente. A maior parte deste insumo é importado, aumentando muito o custo energético indireto da cana. Uso de vinhaça para fertirrigação tem também um alto custo energético para movimentação de volta da usina para a fazenda além da sua aplicação por bombeamento de líquido. Procedimentos e quantidades operacionais são relatados por ALBERTON (2012) e MACEDO (2004). Também tem limitações legais para a sua aplicação, regulado por normas ambientais como as da Cetesb em SP, pois em excesso contamina as águas dos lençóis subterrâneos. Os valores da literatura variam de 4,432 kg/ton cana (GOMES, 2003) até 1,74kg/ton cana (VITTI, 2005). Valor adotado:120kg/ha equivalente a 1,58kg K<sub>2</sub>O por tonelada de cana colhida, usando produtividade de 2015 segundo CONAB (2016a).

**Prim; Cana; exportação Mg** : macronutriente com valor máximo 0,49kg/ton cana, valor mínimo 0,26kg/ton cana (VITTI, 2013), adotado valor 0,36kg/ton cana (VITTI, 2005), um valor intermediário entre os dois extremos.

**Prim; Cana; exportação N :** macronutriente essencial para crescimento da cana. como a aplicação dos macronutrientes N, P e K é feita em larga escala (em termo de peso aplicado por hectare), temos muitas formulações comerciais NPK com frações padronizadas de N, P e K. Estas formulações comerciais facilitam a aplicação simultânea destes nutrientes essenciais e diminui o custo de aplicação. Aqui cabe duas notas. Primeiro, a notação de necessidade para N é para nitrogênio puro, pois temos vários produtos nitrogenados minerais que fornecem nitrogênio na molécula. Cada produto nitrogenado tem diferentes fator F, solubilização diferente, capacidade de absorção diferente pela cana, e reage de modo diferente com os minerais já existentes no solo. Enfim, a determinação do produto nitrogenado a ser aplicado não é simples nem linear. Existem muitos estudos sobre a sua aplicação combinado com outros nutrientes e seu relacionamento com estresse hídrico, afetando de maneira não linear não só a massa de cana produzida, como afeta a quantidade de ATR e fibras. Os nitrogenados mais comuns são uréia, sulfato de amônia, e nitrato de amônia. Cada um tem um fator F diferente, é uma molécula diferente. Como as especificações são para massa de nitrogênio puro, a massa física necessária varia conforme o produto nitrogenado usado. Para ureia, a relação é de 2,1429kg de ureia para cada kg de nitrogênio especificado (cálculo do autor), além do fator F para uréia. A relação de massas para sulfato de amônia é de 4,7143 (cálculo do autor) e a relação para nitrato de amônia é de 2,8571 (cálculo do autor). Por que esta relação e fator F é importante? Porque ambos os fatores determinam a massa física do nutriente que tem que ser transportado e aplicado. Quanto mais massa física, maior a energia total necessária. Na prática, a escolha é ditada por fatores financeiros. O custo extra de transporte e aplicação tem que ser medido contra o custo do produto em si. Por exemplo, uréia é muito mais barato que sulfato ou nitrato de amônia. Dependendo da localização da fazenda, clima, pluviometria e análise de solo, é determinado o melhor produto e a quantidade. Os valores relatados na literatura variam de 1,19kg/tonelada/safra cana (OLIVEIRA, 2012) até 1,70kg/tonelada cana/safra (GOMES, 2003). Nem sempre é claro se a quantidade exportada é somente a massa encontrada no colmo ou se inclui as folhas e pontas. Em nenhum estudo foi discriminado nitrogênio encontrado na massa radicular. Por isso é que é usado muito mais nitrogenado para cana planta que na cana soca, pois a massa radicular é formada uma vez só na cana planta e dura até o fim do ciclo completo. Valor adotado: 1,46kg/tonelada cana. Note que este dado primário se refere à massa exportada, é apenas um indicador para verificação de necessidade de nitrogênio por hectare. (VITTI, 2005; VITTI, 2013; GOMES, 2003; OLIVEIRA, 2012). Este valor valida uma média de 86kg de nitrogênio por hectare com produtividade de 77ton colmo por hectare (CONAB, 2016a). O valor de N adotado nesta dissertação, para manter consistência com MACEDO (2004) foi de 79kg/ha.

**Prim; Cana; exportação P :** macronutriente necessário na cadeia metabólica de energia da planta. Os valores da literatura variam 0,19kg/ton cana até 0,23kg/ton cana. Valor adotado: 0,19kg/ton. (VITTI, 2005; VITTI, 2013). Com a relação de 4,5831 entre massa de  $P_2O_5$  e P, a necessidade real de insumo é de 0,871kg de  $P_2O_5$  por tonelada de cana. Com produtividade de 76 toneladas de cana por hectare (CONAB, 2016a) temos uma necessidade de 66,2kg de  $P_2O_5$  por hectare por colheita. A necessidade de  $P_2O_5$  adotada é de 150kg/ha para cana planta e 40kg/ha para cana soca e cana resoca (VITTI, 2005; VITTI, 2013). SOUZA (2010) com dados de campo mostram o uso de 101kg/ha para cana planta e 23kg/ha para cana soca. MACEDO (2004) relata uso de 120kg/ha para cana planta e 25kg/ha para cana soca. Uma possível explicação para esta discrepância é que pode estar implícito o uso de vinhaça e torta de filtro nas fazendas como adubação orgânica. Falta de fósforo afeta principalmente as folhas.



<p><b>Prim; Cana; exportação S</b> : macronutriente necessário para a formação de proteínas, juntamente com nitrogênio. Os valores encontrados na literatura variam de 0,28kg/ton cana até 0,44kg/ton. Valor adotado: 0,31kg/ton. (VITTI, 2005; VITTI, 2013)</p>
<p><b>Prim; Cana; Fibra Cana</b> : é a fração do colmo que é composta de fibras. Estas fibras são indispensáveis como fonte de energia térmica que permite que a fase industrial seja auto-suficiente em energia. Os valores variam ao redor de 13% (MACEDO, 2004; GNANSOUNOU, 2005; SEABRA, 2008). Esta fração varia um pouco conforme clima, manejo e cultivar. Valor médio adotado é de 13,44% (GNANSOUNOU, 2005). Este valor é referente a massa seca, para fins de conteúdo energético.</p>
<p><b>Prim; Cana; Fração energia bainha</b> : fração da energia total da cana, incluindo ponteiros, folhas, colmo e massa radicular. Bainha é a base da folha, no colmo e ponta, essa energia é perdida durante a colheita, só vai um colmo praticamente limpo. Valor adotado 14,9% (BARBOSA, 2012).</p>
<p><b>Prim; Cana; Fração energia folha</b> : fração da energia total da cana, na folha que ainda está na cana na hora da colheita. Valor adotado 10,9% (BARBOSA, 2012).</p>
<p><b>Prim; Cana; Fração energia folha seca</b> : fração da energia total da cana, na folha já caída, relativamente seca. Valor adotado 13,0% (BARBOSA, 2012).</p>
<p><b>Prim; Cana; Fração energia radicular</b> : fração da energia total da cana, na massa radicular. Esta massa varia muito pouco ao longo do ciclo, portanto, no manejo da cana soca, é necessário menos nutrientes, pois quase não precisa renovar a massa radicular. Valor adotado 31,0% (BARBOSA, 2012).</p>
<p><b>Prim; Cana; Fração massa seca no colmo (fibra + ATR)</b> : teoricamente este valor seria o complemento das energias contidas nos 4 itens anteriores. Os valores da literatura variam de 29,2% até 31,5% (MACEDO, 2010). Usando os valores de BARBOSA (2012), o autor chega ao valor adotado de 30,2%. Isso demonstra que só aproveitamos cerca de um terço do total de biomassa produzida pelo uso do terreno e dos insumos agrícolas. Falta muita pesquisa complementar para aproveitamento total de toda a biomassa produzida, no lugar de abandonar no campo. Uma maneira seria o seu aproveitamento como insumo para adubo verde, minimizando a energia indireta de insumos industrializados. Excesso de biomassa poderia ter tratamento no próprio campo para maximizar compactação antes de ser usado como energia térmica para geração de eletricidade. Existem ciclos térmicos eficientes usando combustão externa, que podem ser adaptados para uso agrícola. Motor Stirling teve uso difundido em regiões de fronteira, antes da disseminação maciça de motores a combustão interna. A grande vantagem é a possibilidade de usar múltiplas biomassas como fonte térmica (RILEY, 2015). Outros tipos mais complexos, para uso estacionário, podem ser empregados (OVERMAN, 1992);</p>
<p><b>Prim; Cana; Mudanças cana por hectare</b> : massa de mudas por hectare usado no plantio em um ciclo de 6 anos. Valor varia de 8 a 18 toneladas por hectare, sendo adotado o valor de 12 toneladas de mudas por hectare, valor este sendo o mais citado pela bibliografia. É assumido que a energia indireta das mudas é uma fração da energia total da cana produzida. A fração estimada é de 3,5% (ver detalhes na seção 3-7-2), varia conforme a produtividade em toneladas por hectare da cana plantada. (MENEGUETTI, 2010; MACEDO, 2004; SOUZA, 2015).</p>
<p><b>Prim; Cana; POL cana</b> : um dos parâmetros de qualidade da cana recebida, embora não linearmente correlacionados com ATR. É determinado por processos de medição da refração da luz no caldo de cana. Seu valor numérico é perto do valor do ATR. (GNANSOUNOU, 2005). Este método é usado na recepção da cana por ser fácil e rápido na sua execução.</p>

**Prim; Cana; produtividade ATR kg/ton :** Açúcares Totais Recuperáveis é um fator determinante de valor pago por tonelada de cana recebida na usina. ATR é o conjunto de açúcares passíveis de servir como substrato para o bioreator de fermentação. Quanto maior, melhor, e é um fator determinante indireto (pela correlação com POL) do preço pago ao produtor pelo lote de cana entregue. É feito uma análise já no momento do recebimento. Se as condições de colheita e transporte não forem boas, perde-se bastante ATR durante a operação de colheita, expedição da cana, e modo de transporte da cana. Quanto mais picada o colmo, maior a perda de ATR, tanto por perda do caldo, como por decomposição enzimática e por degradação química. É expressa em kg ATR por tonelada de cana. O valor médio para o Brasil todo é de 131,30kg/ton cana. (CONAB, 2016a).

**Prim; Cana; produtividade cana ton/ha :** toneladas de colmos colhidos por hectare por safra. Varia conforme cultivar usado, clima recente, região geográfica, manejo, e pragas biológicas. Dados usados retirados de estatísticas oficiais de CONAB (2016a). Valor usado 76,9 toneladas por hectare para safra 2016/2017. Quase todos os autores usam dados de SP, ou no máximo, centro sul, onde a produtividade é bem acima da média brasileira. Em um cenário sem energia fóssil, é necessário usar média brasileira e não média regional. Conforme MACEDO (2004) o valor naquela época era de 82,4 toneladas por hectare, e este valor tem sido replicado mesmo em estudos recentes. Também é relatado o valor de 67,3ton/hectare (SANTOS, 2011). O valor adotado é de 76,9 ton/hectare. (CONAB, 2016a).

**Prim; Cana; produtividade etanol L/ton :** este é um dado que influencia muito os resultados parciais da cadeia toda. Temos valores variando de 88,7 litros/ton cana até 79,49 litros/ton cana (MACEDO, 2004; SANTOS, 2011), passando por 90litros/ton cana (ANDREOLI, 2014), até 100 litros/ton de cana (ZUURBIER, 2008) O valor adotado é de 76,325 litros/ton cana (CONAB 2016a). Uma fonte de incerteza numérica é que a maioria das usinas brasileiras de E1G são usinas integradas com a produção de açúcar. Um dos resíduos da produção industrial de açúcar é o melaço, que é misturado diretamente no caldo antes da fermentação. Financeiramente faz sentido, mas distorce os dados primários das estatísticas de produtividade. Não foram relatados a fração que é injetada, portanto não existe meio confiável de estimar a produtividade correta. Também não foi pesquisado a fração de usinas integradas, para estimar a faixa de erro por contribuição indevida do melaço. MACEDO (2004) usa 180 dias por ano de atividade da usina, com moagem suficiente para 180.000 litros por dia para máxima eficiência energética, com moagem anual de 377.000 toneladas de cana por ano (MACEDO 2004). Usando estes números, resulta uma produtividade industrial de 85,94 litros por tonelada de cana, muito acima da produtividade teórica possível. CONAB (2016a) relata uma média brasileira de 131,1kg ATR por tonelada de cana. Com um rendimento da fermentação de 91,1% (MACEDO, 2004) e uma taxa de conversão mássica de sacarose para etanol de 51,11% (BERNARDO NETO, 2009), temos uma produção média máxima de 61,04kg de etanol por tonelada de cana. Com uma massa específica de 0,791kg/litro de etanol anidro, temos uma produção média teórica de 77,17 litros de E1G por tonelada de cana-de-açúcar. Bem abaixo dos 88,7 litros por tonelada relatado por MACEDO (2004). A grande diferença pode ser explicado em parte por um ATR maior nos dados de São Paulo, mas provavelmente a maior diferença é explicada pela adição do etanol produzido a partir do melaço da produção de açúcar em uma usina mista (açúcar e etanol). Em uma usina de açúcar, sobra ao redor de 40 a 60 kg de melaço por tonelada de cana (MACHADO, 2012). Melaço contém entre 60% a 75% de ATR, em experimentos com cana brasileira (RB85-5156 e SP83-2847-BIS), colhidas em início de safra (MUTTON, 2012). Adotando uma média de 50kg de melaço

por tonelada de cana, contendo uma média de 65% de ATR, temos uma média de 32,5kg de ATR por tonelada de cana, que é usado (normalmente diluído até a concentração de caldo normal para fermentação) para gerar mais etanol. Outro autor menciona 79,8 de mel final com 83,0 de Brix (melaço) com a produção de 123,7 de açúcar com 287,9 de xarope com Brix 66,0 (MACHADO, 2012). O mesmo estudo calcula a recuperação de 69,7% do ATR em açúcar comercializado, portanto, aproximadamente 30% do ATR da cana fica no melaço para ser aproveitado para gerar etanol E1G. Outro autor relata que uma tonelada de cana produz 107kg de açúcar e 12 litros de etanol, e quando usado em uma usina de etanol, produz 80 litros. NOGUEIRA (2008) relata que uma tonelada de cana produz 100kg de açúcar mais 23 litros de etanol. Somando o valor teórico de 77,17 litros com os 12 litros médios, chegamos a 89,7 litros, muito perto dos 88,7 litros por tonelada de cana relatados por MACEDO (2004). Este valor não pode ser usado no cenário de inexistência de energia fóssil, pois a produção de açúcar não vai aumentar na mesma proporção do aumento de produção de etanol. Valor adotado: 76,4 litros por tonelada (CONAB 2016a). Este valor varia ligeiramente a cada trimestre, à medida que as usinas vão informando os dados de produção e estoque para CONAB. Os dados constantes aqui são do relatório do primeiro trimestre de 2016.

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão 6x4 cavalo truck carreta triexio :** consumo de veículos é um tópico crivado de armadilhas técnicas. O consumo depende muito mais do motorista, sobrecarga, idade do veículo, e principalmente, locais de trânsito. Relevos com muitas elevações pode dobrar o consumo em km/litro em relação ao consumo em uma viagem em terreno plano com o mesmo veículo e com a mesma carga útil. Apesar do esforço do autor para usar um valor médio representativo, o valor adotado deve ser usado com cuidado pelo leitor. Valor adotado 1,60km/litro fonte ANTT e CRTC, como subsídio para cálculo de fretes pelo camioneiro ou empresário.

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Bi Trem :** valor adotado 1,60km/L. Estimativa baseado em dados de campo

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Cavalo + carreta :** valor adotado 1,80km/L. Estimativa baseado em dados de campo

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Cavalo trucado + carreta :** valor adotado 1,60km/L. Estimativa baseado em estimativas da ANTT e CRTC

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão RJ1 Romeu Julieta 1 :** esta configuração tem 3 eixos no reboque. O conjunto conhecido popularmente como “Romeu e Julieta” é composto de um caminhão normal que reboca um outro veículo não motorizado, por meio de um cambão<sup>1</sup>. DENATRAN normatiza que tem que ser um caminhão, trucado ou não, com capacidade de tração suficiente para PBT total. O reboque pode ter 3 ou 4 eixos. PBT total varia de 36 a 57 toneladas. Reboque pode ser desengatado, permitindo flexibilidade de operação ao caminhão em si. Literatura relata valores de consumo variando de 1,60km/L até 2,14km/L (MACEDO 2004). Adotado valor médio de 1,87km/L.

<sup>1</sup> Cambão é um termo derivado da época de junta de bois para tração de carroças. Atualmente é uma peça metálica, que liga um reboque a um veículo trator. Mantém distância constante entre os dois veículos, permitindo flexibilidade direcional para permitir manobras e curvas

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão RJ2 Romeu Julieta 2** : esta configuração tem 4 eixos no reboque, no lugar de ter apenas 3 como na RJ1. No entanto, não é relatado a diferença de consumo entre as duas configurações, apesar desta segunda configuração poder levar mais carga útil, e portanto deve consumir mais combustível por quilometro rodado. Por falta de informações, foi adotado a mesma média da outra configuração. Valor adotado 1,87km/L.

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Rodotrem** : um rodotrem é uma composição de carga rodoviária composto de um cavalo mecânico trucado, um reboque conectado por meio de quinta roda, e mais um reboque ligado por “dolly”. Consumo de combustível adotado 1,10km/L (MACEDO 2004).

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Toco** : caminhão com único eixo dianteiro e único eixo trator traseiro, com PBT até 13 toneladas. Consumo pesquisado por levantamento em campo pelo autor, em transportadora em Guarulhos, SP. Valor adotado 4,0km/L. Este veículo não é usado na indústria sucroenergética, pela limitada capacidade de carga útil, ao redor de 7 toneladas. Está aqui apenas como informação complementar.

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Treminhão 9 eixos** : caminhão trucado rebocando dois reboques. Consumo combustível com valor adotado 1,2km/L (MACEDO 2004).

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Trieixo** : composto por um cavalo mecânico, eixo de tração simples ou trucado, rebocando um semi-reboque acoplado a uma quinta roda, podemos levar até 27 toneladas líquidos como carga útil. valor adotado 2,0 km/L, resultado de entrevista com distribuidor de combustíveis no Ipiranga.

**Prim; Energia Direta; consumo caminhão Trucado** : valor adotado 2,2km/L (MACEDO, 2004) embora haja dados da ANTT de 3,0km/L. Dados da ANTT e CTTC tendem a ser mais otimistas porque só tratam de veículos com carga legalizada ou submáxima, e sempre em estradas asfaltadas. Veículos usados na indústria sucroenergética normalmente enfrentam estradas secundárias e andam dentro de fazendas, normalmente com excesso de carga.

**Prim; Energia Direta; consumo Carregadeira cana :** carrega a cana jogada no solo pela colheitadeira e a coloca no veículo de transbordo dentro da fazenda. Em algumas fazendas, é dispensado este equipamento, o caminhão de transbordo acompanha a colheitadeira. Embora dispense um equipamento e seu consumo, por outro lado praticamente imobiliza um outro veículo autopropelido em uma velocidade muito baixa, desgastando o veículo além do consumo extra de combustível em muita baixa velocidade. Nenhum estudo foi feito nesta dissertação para avaliar a melhor combinação. Usando dados de MACEDO (2004), carregadeira com motor de 78HP, com consumo de 7,1Litro/hora de trabalho, com produtividade de 46 toneladas por hora, e usando a taxa de 82,4 toneladas por hectare, chega-se ao valor de 12,7 Litros/hectare. Usando dados de diversos fornecedores brasileiros de carregadeiras de cana, temos um peso bruto de mais de 15 toneladas, motores com potência média de 150 HP. Usando a equivalência básica de 0,225L/h para cada HP de potência (usando rendimento de 35% do motor a ciclo diesel), temos um consumo máximo estimado em 33,75L/hora de operação (cálculo do autor). Adotado um valor médio de 17,0L/hora para consumo mais realista de uma carregadeira de cana, assumindo motor a meia carga em média. Um representante típico é um Caterpillar 938, comprado por usinas. Outro exemplo típico é um Valtra BE1100, acoplado a um trator Valtra BM com potências ao redor de 120HP. Usando os valores de 17,0L/hora de consumo, 600kg por ciclo de carga, 75 ciclos por hora, 45 toneladas por hora, 76 toneladas por hectare, chegamos finalmente a um consumo específico de 28,71L/ha. Valor adotado de 28,71Litros por hectare. Este valor difere muito do valor de 12,7litros/hectare.

**Figura 7-1**Trator de pequeno porte com implementos



Fonte: Catálogo Valtra 2016.

**Prim; Energia Direta; consumo Colheitadeira cana :** a colheita é a atividade com o maior consumo específico de todas as atividades agrícolas. Além da energia da colheitadeira, ainda tem que agregar a energia da carregadeira e do transbordo. Uma colheitadeira típica tem potência de 350HP, trabalhando com velocidades lineares de 3 a 6 km/h. Mais detalhes na Seção 3-7-4. Normalmente com aumento da velocidade aumenta a produtividade horária, mas também aumenta a quantidade de matéria estranha, tanto mineral como vegetal. Esta quantidade é descontada na usina, durante a limpeza da cana, mas impacta no transporte e no preço pago pela usina (SANTOS, 2011; MACEDO, 2004; BELARDO, 2010). Valor adotado 74,17L/ha (SANTOS, 2011; BELARDO, 2010). Muitos detalhes construtivos, consumo medido em campo, modo de operação, produtividade, e parâmetros de ajuste e manutenção se encontra nas referências como BELARDO (2010), COELHO (2009), GIACHINI (2012), LYRA (2012), MANTOAM (2011), OLIVEIRA (2012b), OLIVEIRA (2012c), SANTOS (2011), SCHMIDT JUNIOR (2011).

**Prim; Energia Direta; Energia demanda elétrica usina :** Energia demanda elétrica usina: literatura relata valores globais para a usina inteira, não por atividade. Os valores variam de 14kWh/tonelada cana até 12kWh/tonelada cana (ZUURBIER, 2008 SEABRA, 2008). O valor adotado é de 12,00kWh/tonelada de cana (SEABRA, 2008)

**Prim; Energia Direta; Energia demanda mecânica usina :** a energia mecânica relatada na literatura é normalmente indicada em equivalente kWh por tonelada de cana. Também os dados normalmente são agrupados em um único número, ao redor de 16kWh/tonelada cana processada. Alguns autores que detalham um pouco mais as operações de moagem, mostram dados de intensidade de energia que variam com a quantidade de cana processada diariamente, provavelmente porque variando o volume horário, varia a eficiência das máquinas usadas. Além disso, não é detalhado normalmente quanto desta energia é energia mecânica de vapor, quanto é energia direta de motores elétricos, e finalmente quanto é usado em processos de extração de ATR por difusão e não por moagem. Tudo isso afeta o rendimento energético real e a verificação de energia excedente disponível como eletricidade. Difusão tende a extrair mais ATR que moagem, e usa menos energia elétrica, mas em compensação gera um bagaço com umidade acima dos 50% padrão que a maioria das caldeiras aceita. Aceitando bagaço mais úmido, PCI tende a diminuir bastante. Não foram encontrados estudos comparando estas alternativas. Valor adotado foi de 16,25kWh/tonelada de cana em uma usina de tamanho médio para grande (MACEDO 2004). O valor foi calculado de maneira indireta a partir de dados operacionais do autor referenciado, que relata uso de 22,1HP por tonelada de cana processada com um fluxo de 300 toneladas de cana por hora.

**Prim; Energia Direta; Energia demanda vapor processo usina :** praticamente toda a literatura relata a demanda em quilogramas de vapor por hora por tonelada de cana processada. Este indicador não faz sentido científico para cálculo de intensidade de energia. Sem especificar Temperatura e Pressão do vapor usado nos processos (aquecimento de caldo, evaporação para concentração de caldo, colunas de destilação) individualizado, fica difícil estimar a energia excedente na queima total do bagaço da usina. Muitos autores sequer mencionam as condições operacionais da caldeira (T e P) e muito menos seu rendimento térmico. Nem especifica que tipo de cogeração é usado (só contrapressão ou combinado com condensação). Também não detalham de onde tira o vapor de processo, e em que condições PVT. Nesta dissertação foram assumidas muitas hipóteses, mas este é um ponto que deve ser detalhado em estudos posteriores, pois influencia muito no balanço energético total, com crédito de eletricidade gerada por excedentes de bagaço não necessários para geração de vapor de processo. Os valores variam de 500kg/tonelada cana (NOGUEIRA, 2008) até 340kg/tonelada (ZUURBIER, 2008). O valor adotado nesta dissertação é de apenas 380kg/tonelada cana, retirados a 2,7bar e 130°C, na saída da turbina de contrapressão do gerador elétrico. Com este valor, o excedente de energia elétrica fica perto da estimativa da maioria dos autores. Este valor é um parâmetro que deve ser reavaliado continuamente à medida que a tecnologia avança e à medida que o parque instalado vai se modernizando. Influencia muito o crédito de eletricidade excedente, e portanto, o balanço energético global do EIG.

**Prim; Energia Direta; PCI bagaço cana seco :** a literatura relata valores aproximados para PCI pois não são precisos na definição do que seja bagaço “sêco” e que teor de umidade presente. Os valores variam desde 14,40MJ/kg (SEABRA, 2008; SOUZA, 2010) até 19,259MJ/kg (PITA, 2009; OLIVEIRA, 2013). Usando dados científicos confiáveis, medidos em calorímetro, com umidade controlada por aquecimento em estufa, foram relatados valores como 18,254MJ/kg com 0% de umidade e 15,244MJ/kg com 20% de umidade (SILVA, 2008). Na prática, depois de algum tempo de armazenamento em grandes pilhas, temos bagaço com PCI de 13,41MJ/kg (PERDONÁ, 2013) e 13,57MJ/kg (INNOCENTE, 2011). O valor de 14,40MJ/kg (SEABRA, 2008) veio diretamente de CTC, conforme nota rodapé do autor. Como não foi relatado nenhuma informação adicional (umidade do bagaço, condições físicas), o valor parece ser de bagaço com 20% a 30% de umidade. Esta imprecisão é típica de muitos autores, relatam um valor de uma fazenda, ou associação de classe, ou de uma usina, e sem verificação do contexto ou metodologia de obtenção do dado, usa-o diretamente, gerando resultados imprecisos. Valor adotado de 15,165MJ/kg de bagaço sêco com 20% umidade, resultado de uma média entre dados de vários autores (PERDONÁ, 2013; INNOCENTE, 2011; SILVA, 2008).

**Prim; Energia Direta; PCI bagaço úmido :** adotado valor de 50% de umidade no bagaço úmido. Uma das referências (MACEDO 2004) cita o uso de 280kg bagaço úmido com 50% umidade por ton cana e com excedente 8%, produz 40,3Mcal de energia excedente. Refazendo os cálculos na ordem inversa, temos que 100% da energia de 2800kg de bagaço úmido rende 503.750MJ, que nos leva a um valor de 7,536MJ/kg de bagaço úmido. Outros autores relatam valores como 9,5250MJ/kg medido em calorímetro (SILVA, 2008), 9,63MJ/kg sem metodologia declarada (SEABRA, 2008; OLIVEIRA, 2013), e 7,1845MJ/kg (aalborg industries.com.br). Adotado valor de 8,4689MJ/kg de bagaço úmido, resultado de uma média de 7,5362MJ/kg (MACEDO 2004), 9,5250MJ/kg (SILVA, 2008), 9,63MJ/kg (SEABRA, 2008; OLIVEIRA, 2013) e 7,1845MJ/kg (aalborg industries).

**Prim; Energia Direta; PCI palha cana seca** : é o material deixado no campo, composto de folhas secas da cana, que caíram e secaram naturalmente no solo. A umidade média é de 20% mas o seu recolhimento ainda é difícil e equipamentos ainda estão sendo desenvolvidos. Esta energia não é totalmente aproveitada pelas usinas e não entra no balanço de energia nesta dissertação. Em todo caso, aproximadamente 50% do palhicho (palha + pontas de cana) deve ser deixado no campo como cobertura vegetal e como contribuição de nutrientes. Os valores pesquisados variam de 17,740MJ/kg a 16,980MJ/kg (SEABRA, 2008). O valor adotado é de 17,360MJ/kg, calculado como uma média aritmética dos dois valores.

**Prim; Energia Indireta; area escritorios** : valor adotado 300m<sup>2</sup> por usina típica (MACEDO 2004)

**Prim; Energia Indireta; area oficina** : valor adotado 1500m<sup>2</sup> por usina típica (MACEDO 2004)

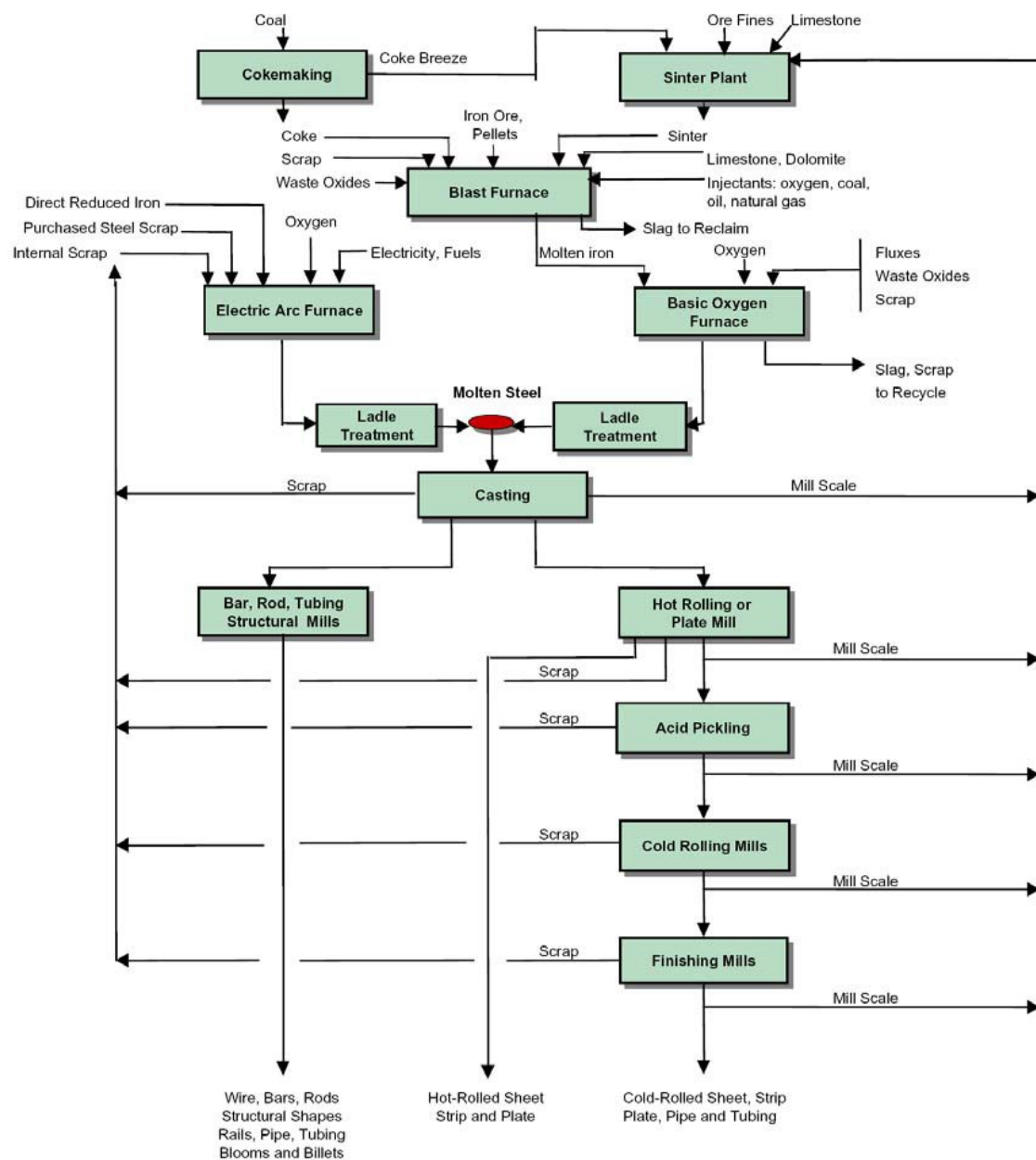
**Prim; Energia Indireta; area predios industriais** : valor adotado 5000m<sup>2</sup> por usina típica (MACEDO 2004)

**Prim; Energia Indireta; area tancagem** : valor adotado 1500m<sup>2</sup> por usina típica (MACEDO 2004)



**Prim; Energia Indireta; energia aço caminhões** : uma das maiores influências de energia indireta alocado à produção de E1G. Ferro e aço são produtos fundamentais em todo e qualquer processo produtivo, direta (veículos, equipamentos, implementos, infraestrutura física) como indiretamente (serviços, manutenção, combustíveis fósseis, insumos químicos, comida para pessoas). Por ser um número tão fundamental, especial cuidado foi usado na pesquisa desde dado. A cadeia produtiva, além de longa e complexa, é muito energívora por envolver grandes quantidades de massa, muitas reações químicas (redução de óxidos), várias formações de ligas. Cada aço tem especificações e processos muito diferentes, com várias etapas de fusão metálica, resfriamento, nova fusão para adição de novos componentes, até formar a liga final, com posterior processamento para formação da peça final.

**Figura 7-2 Fluxograma simplificado de mineração de ferro e principais entradas**



Fonte: WORRELL (2010)

A Figura 7-2 só contempla a transformação do minério beneficiado em ferro e aço bruto. Falta toda a cadeia “upstream” e “downstream” para o fabricante final da peça metálica. Além disso, como ferro é uma commodity, é normal o minério já beneficiado ser transportado por centenas a dezenas de milhares de quilômetros para a produção do ferro ou aço no início do processo ilustrado na Figura 7-2. Apesar do Brasil ser autosuficiente em minério de ferro, importamos peças prontas e alguns aços especiais, cuja produção local é antieconômica. A energia envolvida neste ciclo minério-exportação-produção-importação é desprezado por falta de dados detalhados e por ter provavelmente pouca influência no resultado final.

Um fator de variação da energia indireta em ferro e aço é a proporção de material primário usado na primeira fundição/redução. Pode usar minério concentrado com óxido de ferro ainda, metal reciclado, minério sinterizado, minério pelotizado. Conforme a proporção da mistura, varia muito a energia necessária, pois a redução usa muito coque, que tem a sua parcela de energia útil usada, não só como combustível, mas principalmente como agente redutor. A energia de combustão do coque tem que ser contabilizado como energia indireta embutida no metal produzido, pois energia termodinâmica foi consumida. Usando os dados de energia primária para as 9 operações básicas de produção de aço doce simples (WORRELL, 2010) temos um subtotal de 24.34MJ/kg de aço doce produzido. Falta ainda toda a energia de mineração, beneficiamento e transporte até a aciaria, assim como falta todas as etapas de produção de aço específico (alta resistência, forja, ligas específicas, inox) que exigem mais várias etapas de aquecimento e resfriamento. Somado a todas estas atividades, tem os transportes a longa distância entre mineração e aciaria, e entre aciaria e a produção da peça individual, e entrega a fornecedor (WORRELL, 2010; DOE, 2003; PALACIOS, 2011; CIPEC, 2005; WORRELL, 2008; HASANBEIGI, 2011; IPS, 2003; JANJUA, 2014; PRICE, 2001). Chegando a mais de 26MJ/kg (IPS, 2003). Na literatura é encontrado o valor de 68,830MJ/kg (CARREIRA, 2010), o valor de 62,802MJ/kg (MACEDO, 2004). É adotado o valor de 62,802MJ/kg. Este valor é certamente subestimado. As referências bibliográficas só contabilizam energia direta, sem referências à energia indireta, que normalmente é muito maior que a energia direta. Não há informações precisas sobre uso de recursos humanos, que envolve também muita energia indireta. Há muita pouca informação sobre a energia de conformação do aço para a construção de produtos, esta energia é comparável ou superior à energia de produção do aço simples. A operação de conformação exige muita energia mecânica e em muitos processos, é feito a quente, exigindo aquecimento do aço a uma temperatura de centenas de graus Celsius para facilitar a operação de moldagem mecânica. Os principais processos de conformação de peças metálicas são Laminação, Moldagem, Extrusão, Trefilação, Estampagem, Forjamento. Cada uma destas classes de processos usa muita energia mecânica para mudar não só o formato da peça metálica, como também para mudar a estrutura cristalina dos grãos metálicos, assim como a disposição espacial entre grãos cristalinos. Envolve muito atrito entre metal e ferramentas, mudanças dimensionais, além de lubrificantes específicos entre metal e as ferramentas como moldes. Nestes processos, a energia mecânica necessária é muito maior que a energia térmica envolvida, uma vez que a maioria dos processos é a frio, ou com metal medianamente aquecido. A maioria dos autores especializados em biocombustíveis só relata a energia de produção do aço simples, subestimando muito a energia total necessária. Note que a energia de movimentação dos produtos intermediários e acabados a longa distância (milhares de quilômetros), não é relatado ou incluso.

**Prim; Energia Indireta; energia aço estrutural :** aço estrutural é aço de alta resistência mecânica e química. Geralmente são ligas com metais mais nobres como Ni, Co, Cr, e outros elementos especiais, além de ajuste no conteúdo de carbono. Além disso, sofre diversos tratamentos térmicos para têmpera, e são forjados ou moldados a alta pressão. Tudo isso se traduz em maior intensidade de energia por kg de aço estrutural, que normalmente é especificado para resistência a tração na faixa de 290MPa a 700MPa. Estimativa pelo autor, usando custos de aço simples contra aço estrutural em plataformas de petróleo e construção civil, e usando a média de intensidade de energia em MJ/\$, chega a uma intensidade de energia de 2,5 vezes a intensidade de energia do aço comum, chegando a 157MJ/kg. Acrescentando a este valor, a energia de conformação e acabamento de peças usando aço estrutural é muito maior do que a energia usada na produção de peças de aços comuns. O material é muito mais duro e resistente a deformações mecânicas, exigindo muito mais energia para a formação da peça, e para seu acabamento.

**Prim; Energia Indireta; energia aço forjado :** adotado valor 117,23MJ/kg (MACEDO, 2004). A energia do aço forjado pode ser muito maior, dependendo da aplicação do aço forjado. Forjamento é o uso de força mecânica no aço frio ou moderadamente aquecido a um ponto inferior à temperatura de fusão, para moldar um lingote em uma fôrma de aço ferramenta. A energia da pressão mecânica é usada para modificação da estrutura dos grãos metálicos, eliminação da porosidade interna, aumenta muito a resistência do aço em tensão em MPa, e permite com isso menor peso da peça para a mesma resistência estrutural. Peças forjadas podem passar por mais de uma ação de forjamento, sendo uma grosseira, e mais duas ou três de acabamentos. Entre cada ação de forjamento, normalmente tem um tratamento térmico. Finalmente, após o último grupo de forja+tratamento térmico, temos a operação de acabamento. Em peças como peças para motores e engrenagens, ainda tem mais tratamentos térmicos e químicos para endurecimento superficial da peça. Estas múltiplas operações envolvendo aquecimento, prensagem mecânica, tratamento térmico é que aumenta muito a energia indireta de peças forjadas. As estimativas variam desde 2 vezes a energia de aço comum até mais de 10 vezes a energia do aço do lingote (caso de virabrequim de motores, anéis, engrenagens de câmbio, eixos de powertrain).

**Prim; Energia Indireta; energia aço implementos :** implementos agrícolas são equipamentos que sofrem desgaste acentuado, não somente pela força que exercem, como também pelo efeito abrasivo do solo. Proteção contra intemperismo com camadas de tinta é inviável, devido à abrasão, portanto o metal tem que ser resistente à corrosão. A qualidade mínima exigida é de aço estrutural forjado. O valor adotado é de 117,23MJ/kg, equivalente à energia do aço forjado (MACEDO, 2004).

**Prim; Energia Indireta; energia aço inox :** a energia do aço inoxidável é menor que a energia do aço estrutural, pois o aço inox precisa de metais específicos como Ni e Cr para formar óxidos protetores, mas não precisa de conformação mecânica energívora como aços forjados ou aços estruturais. Valor adotado 79,968MJ/kg (MACEDO, 2004). Na indústria sucroenergético, não é normal o uso de aço inoxidável para outra função que não seja de resistência à corrosão, portanto, não precisa ser aço inoxidável estrutural ou forjado, deve ser aço conformado apenas.

**Prim; Energia Indireta; energia aço tratores :** adotado o mesmo valor que aço de caminhões, por terem estrutura e função semelhante ao de um caminhão médio e pesado. Valor adotado 62,802MJ/kg (MACEDO, 2004) Com as mesmas ressalvas sobre uso de aço estrutural, aço forjado, intensidade de energia de motores e transmissão. No equacionamento final do Vetor Energia por Atividade, foram levados em conta estas variáveis extras sobre o valor médio de aço simples.

**Prim; Energia Indireta; energia cal** : usado na clarificação do caldo de cana, adotado valor 1,2560MJ/tonelada de cana processada (MACEDO 2004). Sendo usado 0,930kg por tonelada de cana, resultando em uma energia específica de 1.3506MJ/kg de cal. Este valor é compatível com o valor de energia na mineração de minérios de ferro. Sem contar energia de movimentação do minério até distribuição e até a fazenda. HASANBEIGI (2011) pg 25 relata valor de 4,5MJ/kg de calcário para uso metalúrgico, provavelmente levando em conta energia indireta de movimentação e beneficiamento pré-movimentação.

**Prim; Energia Indireta; energia caldeiras** : energia indireta de material das caldeiras. Adotado valor 58,615MJ/kg (MACEDO, 2004). Uma caldeira de alta pressão (90bar a 100bar) tem tanto aço inoxidável como aço estrutural na sua composição, na área de alta temperatura. Mas também tem muita estrutura de suporte, fundações, canos de baixa pressão e baixa temperatura, resfriamento, etc. Assim, este valor é considerado subestimado pelo autor, mas é adotado por falta de melhor referência na literatura pesquisada.

**Prim; Energia Indireta; energia ciclohexano** : usado no processo final de desidratação do etanol hidratado (com aproximadamente 6% de água) para etanol anidro (com aproximadamente 0,5% de água). Valor adotado 0,54428MJ/ton cana (MACEDO, 2004). Nesta dissertação, o foco é exclusivamente a produção de etanol hidratado, portanto este valor não é usado. Por outro lado, já existem estudos recentes usando métodos alternativos de desidratação, como uso de membrana semi-permeáveis sob alta pressão. Mas estes estudos focam sempre a eficiência operacional e balanço financeiro, não sendo úteis neste estágio da análise. A energia do ciclohexano não foi utilizado no cômputo final, uma vez que no cenário de esgotamento de energia fóssil, não faz sentido produzir etanol anidro para misturar em combustível fóssil.

**Prim; Energia Indireta; energia destilaria aço carbono** : energia da fração da destilaria que é produzida usando aço carbono. Valor adotado 69,501MJ/kg (MACEDO, 2004).

**Prim; Energia Indireta; energia destilaria inox** : valor adotado 91,999MJ/kg (MACEDO, 2004). Este valor provavelmente é de aço inoxidável não estrutural nem forjado, já que em tanques e dornas, a própria pressão interna dos líquidos dispensa praticamente todo reforço estrutural, exceto na base do tanque.

**Prim; Energia Indireta; energia equipamentos leves** : estimativa de energia total contido em todos os equipamentos leves usados em uma usina típica (MACEDO, 2004). Contudo, o autor MACEDO (2004) não detalha quais são os equipamentos considerados como equipamentos leves. Também não especifica os equipamentos considerados médios e pesados. No entanto esta diferenciação é importante pois a vida útil de equipamentos leves é de apenas 10 anos. A vida útil influencia EROI final pela energia indireta. Valor adotado  $4,8190 \times 10^{10}$  MJ/usina.

**Prim; Energia Indireta; energia equipamentos médios** : estimativa de energia total contido em todos os equipamentos leves usados em uma usina típica (MACEDO, 2004). No entanto esta diferenciação é importante pois a vida útil de equipamentos médios é de 25 anos. Valor adotado  $5,6731 \times 10^{10}$  MJ/usina.

**Prim; Energia Indireta; energia equipamentos pesados** : estimativa de energia total contido em todos os equipamentos leves usados em uma usina típica (MACEDO, 2004). No entanto esta diferenciação é importante pois a vida útil de equipamentos pesados é de 50 anos. Valor adotado  $8,1224 \times 10^{10}$  MJ/usina

**Prim; Energia Indireta; energia escritorios** : usando os dados de  $300\text{m}^2$  de escritório em uma usina, e a intensidade de energia de  $4,50 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>, resulta em um total de  $5,65 \times 10^6$  MJ/usina. Com uma vida útil de 50 anos, resulta em uma intensidade de energia de 113,13GJ/ano/usina (MACEDO, 2004). Para relacionar com a intensidade de energia por hectare e por tonelada de cana processada, foram usados as capacidades operacionais relatados por MACEDO (2004), com 377.000 toneladas de cana por ano.

**Prim; Energia Indireta; energia esteira bagaço 200metros** : segundo MACEDO (2004) uma esteira de bagaço de 200 metros tem uma massa de 180 toneladas, tem uma energia total de  $3,0 \times 10^9$  kcal, para uma produção diária de 120.000 litros por dia, com produtividade de 88,7 litros por tonelada de cana. MACEDO (2004) não especifica a vida útil nem classifica se a esteira de bagaço de 200 metros é equipamento leve, médio ou pesado para fins de estimativa de vida útil. Aqui é classificado como equipamento leve, portanto com vida útil de 10 anos, com taxa de manutenção de 4% anual (MACEDO, 2004). Dividindo a energia total de 3,0109 kcal, equivalente a  $1,63 \times 10^7$  MJ por esteira. Adotando a classificação de “equipamento leve” embora não explicitado por MACEDO (2004), com vida útil de 10 anos, temos uma energia indireta de  $1,63 \times 10^6$  MJ por esteira por ano. Incluindo 4% da energia indireta como energia anual de manutenção, chegamos ao grande total de  $2,29 \times 10^6$  MJ/ano para a esteira de bagaço com 200 metros. Usando o dado da referencia MACEDO (2004) de processamento de 120.000 litros de etanol por dia, e a produtividade de 88,7 Litros por tonelada de cana, temos um processamento diário de 1.352,9 toneladas por dia de produção. Com uma média de 218 dias de trabalho por ano (CONAB, 2016b) temos uma moagem anual de 294.928 toneladas de cana por ano. Usando a energia indireta total e a moagem anual, chegamos finalmente a um valor de 7,75MJ/ton cana processada, só devido à energia indireta da esteira de bagaço de cana. Valor adotado: 7,75MJ/ton cana. A mesma metodologia de estimava é usada para todos os equipamentos da Fase Industrial, isto é, levando em conta manutenção, vida útil, taxa de moagem de cana anual, produtividade industrial de etanol. Deve ser lembrado que a produtividade de 88,7 litros por tonelada de cana provavelmente não é derivado exclusivamente da moagem, mas de etanol produzido pelo melaço da usina anexa de açúcar, e que não deveria ajudar a amortizar a energia indireta dos equipamentos industriais. Estas observações sobre produtividade industrial, taxa de manutenção e vida útil se aplica a todos os equipamentos e edificações da Fase Industrial.

**Prim; Energia Indireta; energia esteira cana 30metros** : segundo MACEDO (2004) uma esteira de cana de 30 metros tem uma massa de 45 toneladas, tem uma energia total de  $7,50 \times 10^8$  kcal. Usando os mesmos números de produtividade e manutenção do item esteira de bagaço de 200m, chegamos ao valor adotado de 1,49MJ/ton cana processada.

**Prim; Energia Indireta; energia fabricação caminhão :** a energia usada na produção de um veículo não é desprezível comparada com a energia indireta do metal em si e dos pneus. (ZVI, 2015; SULLIVAN, 2010). A composição aproximada de um veículo compacto dedicado a passageiros, é de aço 54%, ferro 10%, plástico 10%, borrachas 7%, alumínio 6.4%, vidros 2.8%, cobre 1.7%, chumbo 0.8%, e miscelâneos 7% (selantes, fluidos) (ZVI, 2015). Plásticos, borrachas, alumínio tem intensidade de energia bem acima do ferro e do aço bruto. As atividades de produção de um veículo podem ser divididos em duas grandes classes: transformação de material e montagem (ZVI, 2015). As transformações são subdivididas em duas classes: formação de metais e formação de polímeros. As operações sobre metais são estampagem, extrusão, fundição com molde, acabamento e forja. As operações sobre plásticos e polímeros são moldagem por injeção e moldagem por compressão. A montagem inclui operações de solda, pintura, ar condicionado, elétrica e iluminação (ZVI, 2015). Intensidades de energia das operações : moldagem de alumínio 55MJ/kg, moldagem de ferro 32MJ/kg, forja 45MJ/kg, moldagem por injeção 25MJ/kg, moldagem or compressão 13MJ/kg (não é operação de forja), estamparia 5MJ/kg e extrusão 7MJ/kg. Adotado um peso padrão para um veículo de passeio, de 1.532kg, temos 153kg de ferro. Com 85% das peças de ferro moldados, e 15% das peças forjadas, temos um grande total de 34.500MJ/veículo de 1532kg, resultando em uma intensidade de energia de 22,54MJ/kg só para fabricação (ZVI, 2015). Este valor médio é para um carro de passeio, onde a parte de “powertrain” é pequena em relação ao peso total do veículo (típicamente 10%). Uma revisão da literatura (SULLIVAN, 2010) mostra que os valores de outros autores variam muito, desde 13,5MJ/kg até 52,8MJ/kg. Esta grande variabilidade é devido não somente a fronteira adotada, como também de hipóteses adotadas pelo autor, e da fábrica auditada e seus métodos produtivos. A média aritmética resultou em 27,39MJ/kg, valor semelhante ao da (ZVI, 2015). A intensidade de energia varia dramaticamente de uma operação industrial para outra, variando de 4.167MJ/kg para pintura até 5,1MJ/kg para estamparia. Destaca-se as atividades de forja com 45,1MJ/kg, 32,0MJ/kg para transformação do ferro ou aço bruto em aços especiais para uso automotivo, e 55,3MJ/kg para moldagem de alumínio (SULLIVAN, 2010). Na indústria de veículos pesados, temos mais aços especiais e peças forjadas que um carro comum, em compensação tem pouco alumínio. Além da energia variável (MJ/kg de material processado) temos um custo fixo significativo em energia, inerente à instalação física da fábrica e infraestrutura operacional, como resfriamento e aquecimento ambiental, iluminação, ar comprimido, e movimentação de partes e peças dentro da área fabril. Estes valores foram estimado pelo autor (SULLIVAN, 2010) em 2010, mas depende muito da produtividade da fábrica e da tecnologia usada em cada processo (SULLIVAN, 2010). A intensidade de energia média relatada é de 22,14MJ/kg para um carro com massa de 1.532kg. No entanto, como a energia necessária na operação do veículo é muito maior que a energia usada na sua produção, cada vez mais usa-se materiais e processos que usam mais energia durante a sua produção, porém resultando em menor peso e maior durabilidade, com menor custo operacional ao longo da vida útil (5 a 10 anos pelo menos) como também menor intensidade de energia em MJ/kg de veículo equivalente (THE AUTOMOTIVE INDUSTRY ENVIRONMENTAL ISSUES, 2012). Valor adotado: 22,54MJ/kg. Para ser conservador, o custo fixo de energia da infraestrutura industrial não é usado na contabilização da energia indireta de um veículo. No cálculo da energia indireta total de um caminhão, fatores de correção de intensidade é usada para partes estruturais como motor, caixa de câmbio, sistema transmissão. A parte estrutural como chassis não foi diferenciada por falta de dados confiáveis sobre massa de chassis em relação à massa em ordem de marcha.

**Prim; Energia Indireta; energia fabricação implementos :** adotado o mesmo valor que a energia de fabricação de um caminhão: 22,54MJ/kg. Falta informação sobre processos produtivos e infraestrutura industrial de fabricantes de implementos agrícolas. Implementos são feitos para serviço pesado, como partes estruturais de caminhões, mas para ser conservador não é usado o coeficiente de ajuste usado para motores e sistemas de transmissão de caminhões.

**Prim; Energia Indireta; energia fabricação trator :** adotado o mesmo valor que a energia de fabricação de um caminhão: 22,54MJ/kg, corrigidos por fatores de ajuste para motor e transmissão, mas em um valor diferente de caminhão.

**Prim; Energia Indireta; energia fabricação turbina geradora :** adotado o valor de 39,775MJ/kg (MACEDO, 2004). Não está incluindo energia do material da turbina, nem energia upstream, nem energia de manutenção.

**Prim; Energia Indireta; energia gesso agrícola :** gesso agrícola é basicamente sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>), obtido a partir da desidratação de gipsita (sulfato de cálcio hidratado CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). As principais fontes brasileiras estão situadas nos estados de Bahia, Pará e Pernambuco. Estes 3 estados acumulam 96,5% de todas as reservas de gipsita do Brasil (FERNANDES, 2000). No entanto, em volume de produção real, no ano de 2000, é em Araripe, estado de Pernambuco, com 89,95% do total no ano 2000 (FERNANDES, 2000). No beneficiamento temos uma média de 430kg de inertes por tonelada de gipsita industrialmente útil (FERNANDES, 2000). A energia necessária para a desidratação varia de 6,858MJ/kg de gipsita até 1,432MJ/kg de gipsita, conforme o tipo de forno usado (lenha, carvão ou calcinador usando óleo pesado). Não é detalhado nas referências a fração de produção usando lenha e óleo pesado, mas DNPM informa que em 2000, devido à alta do petróleo, as empresas estão voltando a usar muita lenha, dos quais 80% é de desmatamento (ROLIM, 2012). Adotado o critério de metade da produção usando biomassa, nativo ou de desmatamento, resultando em um valor de 4,145MJ/kg. Este valor não inclui energia de mineração (demarcação, perfuração para explosivos, energia de explosivos, carregamento, primeiro beneficiamento com moagem e separação de inertes, transporte até fábricas). Tampouco inclui energia direta e indireta para transportar o gesso agrícola até o usuário nas regiões de canaviais. Adotado que a energia de mineração seja semelhante à energia usada para minério de ferro, com a ressalva que o minério de ferro tem maior densidade, embora fração de inertes sejam semelhantes.

**Prim; Energia Indireta; energia K<sub>2</sub>O :** adotado valor de 6,6989MJ/kg para produção de K<sub>2</sub>O (MACEDO, 2004). Não é claro se esta energia já inclui produção industrial ou só inclui a parte de mineração e beneficiamento. A maior parte de K<sub>2</sub>O é importado de outros países, vindo por navios graneleiros, para depois ser transportada até as distribuidoras, para depois ser transportada para o cliente final. A energia de importação não foi contabilizada no balanço energético desta dissertação.

**Prim; Energia Indireta; energia lubrificantes :** adotado valor de 0,71176MJ/ton cana processada (MACEDO, 2004). Lubrificantes usados na Fase Agrícola e Fase Distribuição estão embutidos nos custos energéticos da Manutenção, como uma fração anual da energia indireta do veículo ou equipamento sob análise.

**Prim; Energia Indireta; energia mesa lavagem :** MACEDO (2004) relata massa de 42 toneladas com uma energia embutida de  $0,70 \times 10^9$  kcal, resultando em 69,78MJ/kg, que é coerente com a energia de metais em caminhões e tratores.

**Prim; Energia Indireta; energia moenda :** MACEDO (2004) relata massa de 220 toneladas para todos os ternos da moenda completa, com uma energia embutida de  $6,16 \times 10^9$  kcal, resultando em 117,23MJ/kg, que é coerente com a energia de metais forjados, com alta resistência mecânica e resistência à corrosão.

**Prim; Energia Indireta; energia oficina :** MACEDO (2004) relata área de 1.500m<sup>2</sup> para áreas de oficina, e intensidade de energia de  $1,70 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>, equivalente a 7.118MJ/m<sup>2</sup> apenas. Este valor é rateado pela produção anual, relatado em outros tópicos, para chegar a um valor de intensidade de energia por tonelada de cana processada. Este valor é muito baixo para uma oficina, cheio de ferramentas que provavelmente são todas elétricas. Este valor é muito menor que a energia indireta de Escritórios, relatado por MACEDO (2004).

**Prim; Energia Indireta; energia P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** adotado valor de 9,6296MJ/kg (MACEDO, 2004). Não é claro se esta energia já inclui produção industrial ou só inclui a parte de mineração e beneficiamento. A maior parte de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é importado de outros países, vindo por navios graneleiros, para depois ser transportada até as distribuidoras, para depois ser transportada para o cliente final. A energia indireta da importação também não foi contabilizada no balanço energético.

**Prim; Energia Indireta; energia pessoas na agricultura :** temos uma referência na literatura relatando o valor de 7,8712MJ/dia/pessoa. Este é semelhante ao valor médio de 2.000kcal/dia/pessoa usada pela indústria alimentícia brasileira como necessidade básica de uma pessoa média brasileira. O valor usado para uma pessoa média americana é de 2.200kcal/dia/pessoa, pois americanos tem um biotipo maior que o brasileiro, com maior altura e maior massa corporal. Além de ter um inverno rigoroso em algumas partes do país. No entanto, consultando a literatura médica sobre energia usada em exercícios e atitudes laborais, o valor sobe bastante, podendo dobrar facilmente. Usando uma fonte que coleta dados de vários países, (FAO/WHO/UNU, 2001) é relatado uma equação que estima com boa precisão o BMR (Basic Metabolic Rate) ou taxa metabólica basal, a energia necessária para manter o corpo vivo sem atividades de alta intensidade. A equação usada para pessoas do sexo masculino, com idades de 8 a 30 anos, a faixa etária mais comum do trabalhador na agricultura, é  $BMR = 0,063 \times kg + 2,896$  MJ/dia/pessoa. Assumindo uma pessoa de 60kg de massa corporal, temos um BMR de 6,676MJ/dia/pessoa. Mas isso pressupõe que a pessoa não exerceu nenhuma atividade física, exceto as indispensáveis para sua sobrevivência: dormir, comer, higiene pessoal (FAO/WHO/UNU, 2001 Tabela 5.2). Nesta mesma referência (FAO/WHO/UNU, 2001 Tabela 5.1) é montado uma lista de atividades para uma pessoa que exerça atividades físicas não mecanizadas, onde a energia necessária é equivalente a 2,24 vezes a energia de BMR. Porém este fator inclui atividades possíveis como cozinhando, coletando comida e água longe de casa, trabalhos domésticos como limpeza da casa, roupas, louça e outros, andando uma hora por dia além do trabalho, e atividades miscelâneas. Estas atividades, que provavelmente não são executadas pelos trabalhadores rurais brasileiros, soma um total de 14,4 de um total de 53,9. Deduzindo esta parcela, agora o coeficiente passa de 2,25 para 1,646. Que resulta finalmente em uma estimativa para um trabalhador rural de 60kg em um dispêndio energético de 10,988MJ/dia/pessoa. Existem vários estudos brasileiros sobre as condições de trabalhadores rurais, principalmente na lavoura canavieira, onde as condições são semelhantes à de trabalho escravo. Valor adotado: uma média aritmética entre o índice de FAO/WHO/UNU (2001) e de MACEDO (2004), resultando em um valor de 9,43MJ/pessoa/dia. Nem todos os trabalhadores rurais são trabalhadores braçais, mas não foram encontrados dados confiáveis para a proporção de cada tipo de trabalhador.



**Prim; Energia Indireta; energia pneus caminhão** : pneus de veículos contém muita energia, não só porque tem borrachas naturais e sintéticas, como tem metais, fibras, e outros polímeros complexos, em múltiplas camadas. Além disso, o processo de produção demanda muita energia térmica e mecânica, para conformação de materiais, cura de polímeros, e produção propriamente dita. É normal um pneu moderno ter dezenas de compostos diferentes, separados fisicamente entre si, formando um conjunto que é ao mesmo tempo flexível, resistente à abrasões e intemperismo, ter longa vida, e no caso de pneus de veículos pesados, permitir recapagens só com a banda de rodagem, diminuindo o impacto ambiental e o custo energético durante a vida útil de um veículo de carga ou de um trator. MACEDO (2004) relata o valor de 85,829MJ/kg de pneu, o valor adotado é de 84,631MJ/kg (BOUSTANI, 2010a). Todos os insumos necessários para a produção de um pneu não foram considerados por falta de dados confiáveis. Insumos como borracha natural, tecidos sintéticos, fios de aço especiais para carcaça, não tiveram a sua energia indireta relatada ou encontrada em trabalhos acadêmicos confiáveis. Os valores adotados se referem somente à energia necessária para o processo produtivo, não tem energia “upstream”. Na ocasião de cálculo de energia total para um veículo de carga, será levado em conta o número de jogos completos de pneus, e duas recapagens para cada pneu novo, reduzindo bastante a energia necessária para transporte por quilometro rodado.

**Prim; Energia Indireta; energia pneus carro** : embora a tecnologia seja semelhante, pneu de carro tem maior intensidade de energia para a sua produção, que pneu de veículo de carga. Por ter que atender a requerimentos muito mais diversificados que um pneu de uso comercial, e por ter veículos de passeio com características muito diferentes, a variedade de tecnologias para pneus de pequeno porte é maior que os pneus de veículos de carga. Além disso, não é permitido recapagens, normalmente regulamentado por legislação. Nesta dissertação, não foi incluído o uso de veículos leves como camionetes pequenos (capacidade de carga máxima de 1 tonelada), por não ter nenhum relato confiável do seu uso na indústria sucroenergética. Valor adotado 91,717MJ/kg (BOUSTANI, 2010a).

**Prim; Energia Indireta; energia pneus trator** : por falta de dados detalhados, é adotado aqui o mesmo valor usado para pneus de caminhão. Valor adotado 84,631MJ/kg (BOUSTANI, 2010a). É um valor conservador, uma vez que pneus de trator tem uma estrutura básica muito mais reforçada que um pneu de caminhão, e normalmente não é feito para ser recapado. A sua vida útil é medido em horas de trabalho, e muitas vezes dura a vida útil de um trator, cerca de 5 anos. Foi adotado a vida útil igual à do trator, em uma medida conservadora. Não foi encontrado nenhum dado confiável para recapagem de pneus de trator, nem em tecnologia, e muito menos em energia.

**Prim; Energia Indireta; energia predios industriais** : adotado valor relatado por MACEDO (2004), 11.304MJ/m<sup>2</sup> de construção. Assumido que este valor seja representativo das construções predominantemente em alvenaria, típica das construções brasileiras. Em outros países, temos predominância de aço estrutural como esqueleto, mudando a intensidade de energia da construção.

**Prim; Energia Indireta; energia recapagem pneus caminhão** : adotado valor de 47,889MJ/kg por pneu recapado. Este valor é usado para calcular a intensidade de energia de um pneu de uso comercial, com um pneu novo e duas recapagens, reduzindo a intensidade de energia por pneu usado ao longo da vida útil do veículo de carga, e portanto, influenciando favoravelmente o cômputo final do EROI de E1G.

**Prim; Energia Indireta; energia tancagem** : adotado o valor relatado por MACEDO (2004) de 500Mcal/m<sup>2</sup> de tancagem, com uma área total de 4.000m<sup>2</sup> para uma usina representativa. MACEDO (2004) não detalha a taxa de manutenção dos tanques, nem classifica os tanques como equipamento leve, médio ou pesado. Nesta dissertação é classificado como equipamento pesado, reduzindo a um mínimo a sua contribuição à energia total necessária para a fase industrial. Também não está incluso energia de transporte do tanque da fábrica até a usina. Como verificação de consistência, assumindo a hipótese de cada tanque de armazenamento conter 10.000m<sup>3</sup> (segundo fornecedor Dedini, as medidas de tanques de etanol em usinas variam de 500m<sup>3</sup> a 30.000m<sup>3</sup> cada), e com medidas em que minimizem a massa de metal necessário (altura igual ao diâmetro do tanque cilíndrico), chegamos a um raio de 11,68 metros, com uma altura de 23,35 metros. Assumindo uma espessura de 3 milímetros de espessura da chapa, e uma densidade de 7,85 para metal estrutural, temos uma massa de 60,51 toneladas por tanque de combustível. Segundo “ANEXO XXII AO DECRETO No 3.950, de 25 de janeiro de 2010 - NORMA TÉCNICA No 22: ARMAZENAGEM DE LÍQUIDOS INFLAMÁVEIS E COMBUSTÍVEIS”, assumindo que é um tanque de teto flutuante, a distância mínima entre um tanque e outro é de meio diâmetro. Portanto temos que ter uma distância de 35,03 metros entre o centro de cada tanque. Desta maneira, temos apenas 4 tanques de 10.000 m<sup>3</sup> de capacidade cada, em um total de 40.000 m<sup>3</sup>. Usando o valor de energia de aço estrutural, com espessura de 3 milímetros na chapa, temos uma energia total de 1,68×10<sup>7</sup> MJ, que resulta em uma intensidade de energia de 4.206MJ/m<sup>2</sup>, MACEDO (2004) relata o valor de 2.093MJ/m<sup>2</sup>. O mesmo autor relata um valor de 11.304MJ/m<sup>2</sup> para prédios industriais, que contém basicamente metal estrutural. Valor adotado: 4.206MJ/m<sup>2</sup>, total 1,78×10<sup>7</sup>MJ/usina. Pode existir normas da ANP exigindo tancagem para maior armazenamento ou proporcional à produção anual de E1G pela usina.

**Prim; Energia Indireta; energia trator** : MACEDO (2004) relata um valor total de 14,35Mcal/kg, equivalente a 60,08MJ/kg. Este valor é inferior ao valor relatado pelo mesmo autor para aço estrutural (62,802MJ/kg), e muito menor que o valor relatado para aço forjado (117,23MJ/kg), o que é inconsistente. O mesmo autor (MACEDO 2004) relata na Tabela 13 as intensidades de energia de 11,81Mcal/kg para tratores, 15,00Mcal/kg para caminhões e implementos agrícolas, 20,50Mcal/kg para pneus. Convertidos para unidade SI, temos respectivamente 49,463MJ/k, 60,081MJ/kg, 85,829MJ/kg. Um trator tem uma estrutura básica mais reforçada que um caminhão normal, principalmente no trem de força e transmissão final, onde atua com velocidade muito reduzida (entre 2 a 7 km/h) e com torque de aproximadamente 15 vezes necessário em um caminhão de carga com potência equivalente. Isso exige uma estrutura na caixa de câmbio e no diferencial com dimensionamento muito maior que o de um caminhão equivalente, portanto, aços especiais forjados e dimensionados para tal esforço. Como um produto composto de vários produtos não pode ter uma média ponderada menor que qualquer um dos componentes (aço estrutural e pneus), é decidido calcular a intensidade de energia de um trator. Usando os dados de pesos de um catálogo da Valtra (2016), e usando uma frota com os tratores relatados no Macedo (2004), chega-se a um peso médio ponderado para um trator de 5.249,5 kg com intensidade de energia de 69,501MJ/kg. Cada pneu traseiro de trator tem um peso médio de 442,4kg/pneu traseiro, e um peso médio de 55,0kg/pneu dianteiro. No total temos uma média de 994,8kg de pneu por trator, ou aproximadamente uma tonelada só de pneus. Que felizmente duram anos de trabalho, infelizmente sem possibilidade de recapagem. A proporção de peso pneu sobre peso do trator sem pneu é de 18,95%. Usando o critério do autor MACEDO (2004), calculando sobre o peso já incluindo os

pneus, temos a relação 15,93%. O autor MACEDO (2004) estima este fator em 17,9%, coerente com os cálculos aqui relatados. Usando a relação de 15,93% para pneus, chega-se a uma intensidade de energia final para um trator ponderado de 72,102MJ/kg. Adotado valor 72,102MJ/kg ou 450.228,2MJ/trator ponderado com pneus.

**Prim; Energia Indireta; energia turbogeradores :** MACEDO (2004) informa uma energia de fabricação de 9,5Mcal/kg de conjunto turbina/gerador elétrico, além de energia (provavelmente só do material, autor não é explícito) de 900Mcal pra 50 toneladas de equipamentos. Usando os 3 dados (energia fabricação, energia do material e massa total) chega ao grande total de 115,14MJ/kg de conjunto turbina e gerador elétrico. Como equipamento pesado, com vida útil de 50 anos, temos uma taxa anual de energia de 345.420MJ/usina/ano, já incluindo energia de manutenção com uma taxa anual de 4%. Valor adotado: 115,14MJ/kg de turbogerador elétrico.

**Prim; Energia Indireta; fator manutenção caminhão :** MACEDO (2004) indica que a energia usada na manutenção ao longo da vida útil é de 60,70% da energia do caminhão. Esta energia de manutenção é adicionado à energia de material e de produção do caminhão, e rateado de maneira correta para a atividade (por hora, por tonelada de carga, por quilômetros rodado).

**Prim; Energia Indireta; fator manutenção implemento :** MACEDO (2004) indica que a energia usada na manutenção ao longo da vida útil é de 92,60% da energia do implemento. Esta energia indireta é adicionada à energia de materiais e rateada por horas de uso ou por tonelada de biomassa manipulada.

**Prim; Energia Indireta; fator manutenção trator :** MACEDO (2004) indica que a energia usada na manutenção ao longo da vida útil é de 89,10% da energia do trator. Esta energia é adicionada à energia de materiais do trator e rateada para a sua vida útil em horas ou hectares ou toneladas de biomassa manipulada.

**Prim; Energia Indireta; fator pneus caminhão :** MACEDO (2004) indica que a energia equivalente dos pneus usados ao longo da vida útil é de 6,0% da energia do caminhão, em média. Valor não usado nos cálculos internos. Além da intensidade de energia de pneus de caminhão, foi considerado que cada jogo de pneus novos são recapados duas vezes, sendo usado 9 jogos completos, entre novos e recapados, ao longo da vida útil de um caminhão médio ou pesado, em uso rodoviário, em vias asfaltadas.

**Prim; Energia Indireta; fator pneus implemento :** embora existam implementos agrícolas apoiados em rodados, nesta dissertação não é mencionado nenhuma atividade que o use. Adotado valor zero.

**Prim; Energia Indireta; fator pneus trator :** MACEDO (2004) indica que a energia equivalente dos pneus usados ao longo da vida útil é de 17,90% da energia do trator. Este valor não foi usado nos cálculos internos. O cálculo detalhado é descrito na energia indireta do trator.

<p><b>Prim; Energia Indireta; moagem cana anual :</b> MACEDO (2004) usa 180 dias por ano de atividade da usina, com moagem suficiente para 180.000 litros por dia para máxima eficiência energética, com moagem anual de 377.000 toneladas de cana por ano (MACEDO 2004), resultando em uma moagem de 2.094 toneladas de cana por dia. este valor parece ser muito baixo, o valor adotado é de 1.071.229 toneladas por ano por usina, moendo a uma taxa de 300 toneladas por hora (MACEDO 2004), funcionando por 218 dias por safra (CONAB, 2016b), resultando em um dia de trabalho com aproximadamente 16 horas. Valor adotado: 1,071 milhões de toneladas anuais. Esta produtividade é representativa das usinas mais rentáveis de 2016. Influencia diretamente no EROI final. Quanto maior a produtividade anual da usina, melhor EROI final.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Bi Trem :</b> número pneus 26. Fonte DENATRAN e definições dos veículos autorizados a rodar em rodovias brasileiras. A mesma fonte vale para todas as configurações de veículos rodoviários em território brasileiro.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus carreta caminhão ponderado :</b> número pneus 27. Este número foi calculado assumindo um veículo de carga fictício, uma média de 4 veículos de alta capacidade, especificamente para transporte de cana e insumos de baixo valor agregado como adubos, calcário, gesso agrícola. Os veículos considerados são: cavalo trucado com carreta semi-reboque de 3 eixos (22 pneus) + RJ1 Romeu Julieta com Julieta com um eixo dianteiro (22 pneus) + RJ2 Romeu Julieta com Julieta com dois eixos dianteiros (26 pneus) + rodotrem (34), com o resultado arredondado para próximo inteiro superior. Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Cavalo + carreta :</b> número pneus 18. Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Cavalo trucado + carreta :</b> número pneus 22. Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus RJ1 Romeu Julieta 1 :</b> número pneus 22. Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus RJ2 Romeu Julieta 2 :</b> número pneus 26. A diferença deste veículo para RJ1 é que o reboque tem dois eixos na dianteira, permitindo maior capacidade de carga pela legislação atual de 2016. Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Rodotrem :</b> número pneus 34 Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Toco :</b> número pneus 6 Fonte: regulamentação DENATRAN. Este tipo de veículo não é utilizado na indústria sucroenergética.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Treminhão 9 eixos :</b> número pneus 34 Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Trieixo :</b> número pneus 14 Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; numero pneus Trucado :</b> número pneus 10 Fonte: regulamentação DENATRAN.</p>

**Prim; Energia Indireta; numero trabalhadores sucroenergetico :** o número de trabalhadores na área sucroenergético é nebuloso e muito variável. Isso porque esta atividade tem muita informalidade e terceirização de mão de obra. Segundo NEVES (2014) contando os diretos e indiretos, chegamos ao máximo de 3,56 milhões de pessoas trabalhando temporariamente para este setor da economia. Segundo a mesma referência, usando dados da CAGED e RAIS, temos um mínimo de 988.260 trabalhadores registrados em 2013. Valor adotado: 1.135.800 trabalhadores, pico de trabalhadores registrados ocorrido em 2008. A produção de etanol aumentou até 2014, e embora tenha diminuído um pouco, temos que contar que sempre existe uma parte de trabalhadores informais. É assumido que a longo prazo este número de trabalhadores não vai aumentar, sendo a produção de bioenergia cada vez mais mecanizada. A energia direta dos trabalhadores humanos influencia muito pouco no EROI final. Se fosse computado a energia indireta de cada trabalhador brasileiro, o valor total poderia ser uma ordem de grandeza maior. Nesta dissertação, só foi considerado energia direta.

**Prim; Energia Indireta; payload truck combustivel ou cana aberto :** a legislação brasileira, em consonância com a maioria da legislação internacional e de acordo com motivos técnicos sobre conservação do pavimento rodoviário, limita a carga por tipo de eixo (simples, duplo, tandem, distância entre eixos tandem, distância entre conjuntos de eixos, etc) e por PBT (Peso Bruto Total) que inclui peso do veículo, peso dos implementos (carroceria, suspensor de eixo, engates, etc) e claro, a carga. Um caminhão trucado pode levar de 15 toneladas de carga útil (carroceria aberta, sem outros implementos) até menos de 13 toneladas (carroceria para líquidos especiais, vasos altamente reforçados, vasos especiais para produtos tóxicos com múltiplas válvulas de segurança, etc). Como o foco é a indústria sucroenergética, é adotado o valor de 15 toneladas por caminhão trucado.

**Prim; Energia Indireta; peso caldeiras :** segundo MACEDO (2004) a usina padrão usado no estudo dele tem massa de 310 toneladas. Para manter a consistência entre valores de energia e equipamentos, o valor adotado é de 310 toneladas.

**Prim; Energia Indireta; peso destilaria aço carbonoo :** adotado valor de 400 toneladas, conforme MACEDO (2004). Valor não usado na dissertação.

**Prim; Energia Indireta; peso destilaria inox :** adotado valor de 76 toneladas de aço inoxidável para a destilaria, conforme MACEDO (2004). Valor não usado na dissertação.

**Prim; Energia Indireta; peso esteira bagaço 200metros :** esta esteira é usada para levar bagaço de cana da moenda para a pilha de depósito de bagaço para posterior consumo interno como fonte de energia. Valor adotado de 200 metros de extensão, com peso de 180 toneladas, ou seja, 900 kg de material por metro, entre aço dos roletes, motores principais e auxiliares, polímeros da correia, metal estrutural de reforço da correia, guias da correia, e principalmente, a estrutura de suporte físico da correia, que começa com cota baixa ao lado da moenda, e termina com cota alta para poder despejar em uma pilha que se acumula, normalmente ao ar livre. A energia direta da sua operação está incluído na energia elétrica total para a usina toda, conforme MACEDO (2004). Este dado não foi usado diretamente, energia indireta desta esteira foi embutido no subtotal de equipamentos leves e pesados conforme MACEDO (2004), pois não foi destacado a vida útil nem taxa de manutenção deste equipamento na usina.

**Prim; Energia Indireta; peso esteira cana 30metros** : esta esteira é usada para levar a cana cortada da área de recebimento até a moenda. Tem extensão bem menor que a esteira de bagaço, pois não pode ter uma pilha de armazenamento temporário grande para cana recém cortada. Cada hora depois do corte submete a cana a uma degradação microbiológica e a uma perda por oxidação dos açúcares em contato com oxigênio atmosférico. A moagem, assim como a movimentação da cana, é concomitante ao recebimento de cada carga. Valor adotado é de 45 toneladas (MACEDO 2004). Note que a massa por metro linear é bem maior que o índice para a esteira de bagaço. Isso é justificado pela maior carga linear, pois cana tem uma densidade em kg/m<sup>3</sup> muito maior que bagaço. A energia direta da sua operação está incluído na energia elétrica total para a usina toda, conforme MACEDO (2004). Este dado não foi usado diretamente, energia indireta desta esteira foi embutido no subtotal de equipamentos leves e pesados conforme MACEDO (2004), pois não foi destacado a vida útil nem taxa de manutenção deste equipamento na usina.

**Prim; Energia Indireta; peso mesa lavagem** : valor adotado de 42 toneladas (MACEDO, 2004). Este dado não foi usado diretamente, energia indireta desta esteira foi embutido no subtotal de equipamentos leves e pesados conforme MACEDO (2004), pois não foi destacado a vida útil nem taxa de manutenção deste equipamento na usina.

**Prim; Energia Indireta; peso moenda** : segundo MACEDO (2004) a moenda da usina típica tem 5 (cinco) ternos, com um peso total de 220 toneladas, com capacidade mínima de 300 toneladas de cana por hora de funcionamento. Este dado não foi usado diretamente, energia indireta desta esteira foi embutido no subtotal de equipamentos leves e pesados conforme MACEDO (2004), pois não foi destacado a vida útil nem taxa de manutenção deste equipamento na usina.

**Prim; Energia Indireta; peso motor caminhão leve** : valor adotado 280kg para um motor Cummins ISF para caminhões com PBT até 9 toneladas. Informação no site da Cummins em 2016.

**Prim; Energia Indireta; peso motor caminhão médio** : valor adotado 499,4kg para um motor Cummins modelo ISB de 6 litros. Informação no site da Cummins em 2016.

**Prim; Energia Indireta; peso motor caminhão pesado** : valor adotado 1.421kg para um motor Volvo modelo SCR D16-500/1850. Informação no site da Volvo em 2016.

**Prim; Energia Indireta; peso pneus caminhão** : adotado valor de 55kg por pneu de caminhão (BOUSTANI, 2010a)

**Prim; Energia Indireta; peso pneus carro** : adotado valor de 11,3 kg por pneu de carro passeio (BOUSTANI, 2010a)

**Prim; Energia Indireta; peso pneus trator dianteiro :** Estimar dados para rodantes de tratores agrícolas é um assunto árido, altamente técnico e muito mais difícil que estimar rodantes para caminhões de carga rodoviários. Veículos de carga rodoviários tem pneus relativamente padronizados em dimensões (largura da banda de rodagem, diâmetro do aro interno). Pode variar bastante em tecnologia e composição de materiais, mas a média de massa e composição não varia muito. Para tratores, o material rodante, que transmite a força do trem de força (powertrain) até o solo, pode ser com pneus específicos, ou por meio de esteiras. Nesta dissertação só é detalhado rodante usando pneus. Mesmo assim, como o solo não é tão padronizado como uma rodovia asfaltada, e o tipo de trabalho varia muito (arrasto, transporte de peso, combinado), e podendo ter só tração traseira ou tração total, com preocupação de compactação do solo, além de preocupações com umidade do solo (afeta muito desempenho de tração e compactação). Estas variações ambientais exigem uma gama de variações de características muito superior às variações de características de pneus de caminhões pesados. Pneus de trator podem ser radiais ou diagonais (nem sempre radial é a melhor escolha para uma determinada combinação de solo e tipo de serviço), geralmente com 8 a 12 “lonas” ou camadas de reforço estrutural estabilizante, com larguras de banda de rodagem que varia de 185 milímetros a mais de 600 milímetros, com massas variando de 30kg (pneus direcionais semelhantes aos usados em caminhões simples) até pneus massivos com mais de 500 kg, e ainda com necessidade de lastreio com água dentro do pneu. Felizmente, associações internacionais definem algumas normas de dimensões típicas para pneus de tratores. A ALAPA (Associação Latino Americana de Pneus e Aros), a ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organization) e a TRA (Tire and Rim Association) são grupos técnicos que estabelecem padrões para os fabricantes de pneus e aros e códigos para identificar a aplicação específica para a qual o pneu agrícola foi desenvolvido. Figura 7-3 mostra um pequeno trator, que mesmo de pequeno porte, tem TDA (Tração Dianteira Auxiliar) onde existe tração dianteira mas com o objetivo de ajudar a direcionar e não permitir acumular terra na frente do trator. O acúmulo de terra nas rodas dianteiras afeta a dirigibilidade e a precisão do traçado da rota, e ajuda a compactar a terra, uma característica indesejável na agricultura. A força de tração fica quase que exclusivamente dedicado à roda traseira. Figura 7-4 mostra um trator pesado, para arrasto de grandes cargas em terreno não pavimentado. Note que pneu dianteiro é praticamente do mesmo tamanho que o pneu traseiro, e a tração é distribuído quase igualmente para ambos os eixos. O objetivo é conseguir o máximo de tração. Neste caso, o peso do rodante dianteiro é quase igual ao traseiro, exceto no lastro no eixo traseiro. Figura 7-5 mostra um caso extremo de trator com TDA onde para conseguir tração, cada eixo tem 4 pneus, como caminhões pesados. Figura 7-6 mostra um trator médio com TDA e com possibilidade de lastro de água dentro de cada pneu para máxima tração.

**Figura 7-3 Trator pequeno porte com TDA e pneus apropriados não direcionais**



Fonte Catalogo John Deere 2016



**Figura 7-4 Trator pesado 370HP com TDA para arrasto de carga agrícola em vias OTR**



**Fonte Catálogo John Deere 2016**

**Figura 7-5 Trator extra pesado para tração extrema**



**Fonte Catálogo John Deere 2016**

**Figura 7-6 Trator representativo com pneus típicos e 323kg por pneu ponderado**



**Fonte Catálogo John Deere 2016**

É adotado como massa para um pneu dianteiro representativo de trator, um valor que seja a metade da massa de um pneu traseiro típico de trator com massa na ordem de 323kg. Estas massas são consistentes com a referência MACEDO (2004) que relata a relação entre peso de pneus e peso do trator em 17,9%. Aplicando esta relação ao peso médio de um trator típico com 5250kg de peso, temos uma massa média para pneus de 939,75kg total. Perto dos 970kg estimados usando um valor médio de 323kg por pneu traseiro e 162kg para cada pneu dianteiro. Outro catálogo de John Deere Brasil S. A., Nº. CQ41964 Edição D1, tem uma tabela de pneus recomendados, com pesos variando de 30kg até 485kg. valor adotado para pneu dianteiro de trator: 162kg por pneu.

**Prim; Energia Indireta; peso pneus trator traseiro** : valor adotado 323kg por pneu

**Prim; Energia Indireta; peso turbogeradores** : valor adotado 50 toneladas (MACEDO 2004)

**Prim; Energia Indireta; químico industrial ácido sulfúrico** : valor adotado 3,0982MJ/ton cana (MACEDO 2004), com produtividade de 88,7 litros de E1G por tonelada de cana. É importante relacionar o consumo com a produtividade em litros, pois o consumo é para tratamento do caldo gerado, não para uso da cana antes da moagem.

**Prim; Energia Indireta; químico industrial cal** : usado na clarificação do caldo e para correção de pH. Valor adotado 1,256MJ/ton cana (MACEDO 2004). Não foi relatado o valor por litro de E1G produzido. portanto este valor foi recalculado para a produtividade informada por MACEDO (2004) de 88,7 litros por tonelada, e o valor resultante de  $3,493 \times 10^{-02}$  MJ/litro de etanol.

**Prim; Energia Indireta; químico industrial ciclo hexano** : usado para produção do E1G anidro a partir de E1G hidratado. Valor adotado 0,54428MJ/ton cana (MACEDO 2004). Na dissertação não foi contemplada a produção de etanol anidro, portanto este valor não foi usado.

**Prim; Energia Indireta; químico industrial lubrificantes** : valor adotado 0,71176MJ/ton cana (MACEDO 2004). Este valor foi convertido também pela produtividade de 88,7 litros por tonelada, resultando em  $8,024 \times 10^{-03}$  MJ/litro de etanol.

<p><b>Prim; Energia Indireta; quimico industrial soda em escamas</b> : usado para tratamento do caldo, valor adotado 0,75362MJ/ton cana (MACEDO 2004). Convertido para <math>8,496 \times 10^{-03}</math> MJ/litro de etanol.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; taxa manutenção instalação industrial</b> : percentual da energia total da instalação industrial, equivalente à energia indireta na manutenção. Valor adotado 4% (MACEDO, 2004), ou seja, entre material e serviços, usa 4% de toda a energia embutida na instalação industrial, para a manutenção anual.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida util caminhão leve km</b> : valor adotado 800.000 km com manutenção adequada e usado dentro de limites técnicos, sem sobrecarga de peso, em uso predominantemente rodoviário. Em uso predominantemente urbano, para entregas urbanas, com engarrafamento, a vida útil é bem menor, podendo chegar a menos da metade. Fonte: resultado de entrevistas do autor com empresas de transporte rodoviário em Guarulhos.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida util caminhão leve tempo</b> : valor adotado 60 meses ou 5 anos de uso intensivo, com manutenção correta. O dado é resultado de entrevistas do autor com empresas de transporte de Guarulhos, e dados do GuiaDoTRC e CNT em 2016.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida util caminhão médio km</b> : valor adotado 800.000 km com manutenção adequado. Caminhões médios, com PBT até 23 toneladas, trucados, geralmente são usados em percursos rodoviários médios e longos, com desgaste menor dos componentes rodantes. A vida útil é bastante consistente, já que as condições rodoviárias são mais regulares que as condições urbanas de trânsito. O dado é resultado de consulta aos sites da CNT e GuiaDoTRC em 2016.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida util caminhão médio tempo</b> : valor adotado 72 meses ou 6 anos. A vida útil em anos é um pouco mais longo que em caminhões leves, pois tem menor desgaste dos implementos em trânsito interurbano. A vida útil é mais determinado pelo trem de força e rodantes. O dado é resultado de consulta aos sites da CNT e GuiaDoTRC em 2016.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida util caminhão pesado km</b> : caminhões pesados tem vida útil bem diferentes conforme seja usado no transporte de carga dentro de padrões rodoviários com frete de longa distância, dentro dos limites legais e técnicos, ou alternativamente sendo usado no transporte de carga “bulk” como cana, entulho, areia, e semelhantes, normalmente com sobrecarga de peso, em distâncias relativamente curtas (dezenas de km a cada viagem), trabalhando quase sempre com o trem de força em regime de potência máxima. A vida útil, no segundo cenário (carga “bulk”) a vida útil é bem menor, além de uma manutenção maior, e nem sempre efetuada. (CARREIRA, 2010) tem um estudo detalhado sobre custeio e uso de caminhões dentro da indústria sucroenergética e relata uma vida útil de 500.000km. Em uso rodoviário de média e longa distância, a vida útil chega facilmente a 800.000km, e em caminhões exclusivos de longa distância, com motores acima de 350HP, a vida útil chega a 1.200.000km com manutenção correta. Fonte: estatísticas da CNT e GuiaDoTRC em 2016. Valor adotado: 500.000km.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida util caminhão pesado tempo</b> : valor adotado 7 anos, pois é usado em viagens de baixa distância, com mais tempo de espera que tempo de trânsito. Valor adotado 84 meses ou 7 anos (GuiaDoTRC; CARREIRA, 2010)</p>

<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida útil colheitadeira :</b> MACEDO (2004) relata vida útil de 5 anos, e OLIVEIRA (2012b) relata uma vida útil de 6 anos. Geralmente uma colheitadeira é usada em 2 turnos de trabalho, e em casos extremos, 3 turnos de trabalho. Valor adotado 5 anos. A alocação de energia indireta é dado pela produtividade em hectares por hora de trabalho, além da taxa de manutenção anual. Não foram encontrados dados sobre vida útil de colheitadeira em horas de trabalho, que é a medida usual para mensuração de vida útil de equipamentos agrícolas e fora de estrada.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; vida útil edifício :</b> valor adotado 50 anos (MACEDO 2004). Este dado é respaldado por recomendação da ABNT NBR 6118, que regula a vida útil de concreto. Como no Brasil é normal usar concreto em vigas como elemento estrutural, a vida útil estimada de um edifício é limitado aos 50 anos, embora na prática, com boa manutenção, e principalmente em climas mais secos, a vida útil seja maior. Porém, muitos subsistemas dentro do edifício tem vida útil bem menor. Subsistemas hidráulicos e elétricos tem vida útil ao redor de 10 anos. Subsistemas de insumos industriais tem vida útil muito variável (vapor, ácidos, químicos em geral) geralmente medidos em poucos anos. Como não temos dados detalhados sobre a vida útil destes subsistemas, é adotado o valor de 50 anos para todo o edifício incluindo subsistemas, mas é notado que estamos subestimando a intensidade de energia para edifícios industriais.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida útil implemento :</b> segundo MACEDO (2004) a vida útil de um implemento agrícola é de 8 anos. Como são equipamentos passivos (são arrastados, não autopropelidos, às vezes com energia fornecida pela tomada de potência do trator para acionamento de partes hidráulicas ou bombas ou dispensadores de sementes e insumos), e como são feitos de aços estruturais e eixos forjados, a vida útil é mais longa que máquinas agrícolas autopropelidas. Mas a taxa de manutenção é mais alta que a de tratores e caminhões.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; vida útil maq leve :</b> valor adotado 10 anos (MACEDO 2004). Infelizmente o autor não especifica quais equipamentos industriais são considerados leves, médios ou pesados para fins de vida útil.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; vida útil maq pesada :</b> valor adotado 25 anos (MACEDO 2004).</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida útil trator horas :</b> valor adotado 6.000 horas (MACEDO 2004). Este dado não pode ser extrapolado para uma colheitadeira, que tem uma complexidade maior e um regime de trabalho onde quase sempre está no desempenho máximo.</p>
<p><b>Prim; Energia Indireta; Vida útil trator tempo :</b> valor adotado 5 anos (MACEDO, 2004 SOUZA, 2010).</p>
<p><b>Prim; Indicador; area plantada cana :</b> dados de CONAB (2016a) mostram que do total de 9,0737 milhões ha plantados no Brasil na safra 2016/2017, 34,2% é dedicado à produção de etanol hidratado, e 22,6% é dedicado para a produção de etanol anidro. Destes números resulta o valor adotado de 5,1539 milhões de hectares dedicados para etanol, sendo o resto da área dedicado para produção de açúcar.</p>
<p><b>Prim; Indicador; Ciclo de vida canavial :</b> valor adotado 6 anos, com a cana planta ocupando entre um ano a um ano e meio, e cada safra de cana soca ocupando um ano. Cada safra não ocupa rigorosamente um ano ou um ano e meio. O amadurecimento de cada safra é determinado mediante amostragens no campo para escolha da melhor época de colheita (máximo ATR x tonelagem).</p>
<p><b>Prim; Indicador; Colheitas no ciclo :</b> valor adotado 5 anos. Este valor pode variar um pouco conforme região do país e conforme cultivar, mas é um consenso entre quase todos os autores que o ciclo total é de 6 anos por 5 safras.</p>

<p><b>Prim; Indicador; densidade diesel</b> : valor adotado 0,835kg por litro. A composição do diesel não é uniforme, varia ligeiramente conforme o petróleo base e conforme a refinaria. Em outros países de inverno rigoroso, o diesel de verão tem composição diferente do diesel de inverno, visando proteção contra microrganismos no verão e proteção contra formação de cera no inverno.</p>
<p><b>Prim; Indicador; densidade Etanol Anidro</b> : valor adotado 0,791kg por litro.</p>
<p><b>Prim; Indicador; densidade Etanol Hidratado</b> : valor adotado 0,80354kg por litro, calculado pelo autor com 6% de água</p>
<p><b>Prim; Indicador; densidade gasolina</b> : valor adotado 0,755kg por litro. Vela as mesmas observações sobre densidade e composição, que as referentes ao diesel.</p>
<p><b>Prim; Indicador; densidade media cana colhida</b> : segundo CARDOSO (2011) a densidade média de cana colhida e carregada em caminhão tem densidade entre 350kg/m<sup>3</sup> e 339kg/m<sup>3</sup>. Valor adotado 344,5kg/m<sup>3</sup>, uma média aritmética dos dois valores relatados pelo autor referenciado. Esta densidade varia um pouco conforme a cana seja cortado em colmos inteiros, ou em toletes menores. Cortado em toletes, temos maior densidade, porém a perda de caldo e de açúcares logo após o corte e durante transporte é maior, mas pode transportar maior massa com o mesmo caminhão. Cortado em colmos inteiros, preserva-se mais o conteúdo útil, mas a densidade diminui porque os colmos se entrelaçam, sem se alinhar perfeitamente, diminuindo a densidade aparente.</p>
<p><b>Prim; Indicador; densidade media petroleo bruto</b> : valor adotado 0,81kg por litro. Os valores podem oscilar desde 0,92 até 0,72 kg por litro. A composição do petróleo é muito variado, depende muito de onde é extraído e da histórica geológica. Por isso, uma refinaria é projetado e otimizado para uma faixa pequena de variação de composição, para máximo rendimento de todas as frações. Petróleo pesado precisa de craqueamento catalítico para gerar mais frações leves. Petróleo leve é mais valioso. Conteúdo de enxôfre e outros minerais afetam tanto a densidade como o desempenho do refino e dos produtos acabados, além de determinar o projeto da refinaria.</p>
<p><b>Prim; Indicador; dias usina por ano</b> : segundo MACEDO (2004) uma usina funciona 180 dias por safra. Segundo (CONAB, 2011) uma usina funciona 218 dias por safra. Esta variação, além da capacidade de moagem diária, afeta muito a energia indireta durante a fase industrial de EIG. Valor adotado: 218 dias por safra, com 300 toneladas por hora de moagem.</p>
<p><b>Prim; Indicador; horas usina por dia</b> : valor adotado 20,5 horas por dia, obtido dividindo o número de horas de usina por ano, 4.468 horas por ano (CONAB, 2016a) pelo número de dias por ano, 218 dias por ano. Este dado é indiretamente usado para estimativa de energia humana necessária, pois com estes dados, é necessário no mínimo 2 turnos de trabalho por dia de processo. Infelizmente, não existem relatos sobre o número de pessoas ocupadas em uma usina típica. Ao contrário da fase agrícola, onde temos pelo menos uma estimativa de pessoas empregadas, formalmente e informalmente. Energia indireta de humanos trabalhando na usina não foi contabilizado no balanço energético final. Dado não usado.</p>
<p><b>Prim; Indicador; horas usina por ano</b> : valor adotado 4.468 horas por ano (CONAB, 2016a).</p>

<p><b>Prim; Energia Indireta; moagem cana anual :</b> segundo MACEDO (2004) a moagem anual da usina típica é de 365 mil toneladas por safra. Segundo (CONAB, 2016a) a usina típica tem uma moagem de 1,3404 milhões de toneladas de cana por safra. A procura por um cadastro nacional confiável foi frustrante. Aparentemente não existe a obrigatoriedade de cadastro de usina produtora de álcool, mesmo porque nem todo álcool produzido é para fins automotivos. Segundo Novacana, que lista as maiores usinas do Brasil, temos aproximadamente 366 usinas funcionando em 2016. No entanto, nenhuma usina é obrigado a se cadastrar na organização Novacana. CONAB não tem nenhum documento formal sobre o número de usinas atuantes. ANP tem controle rigoroso sobre produtos petroquímicos, número de refinarias, número de distribuidoras, número de postos de combustíveis, respectivos volumes, perdas, etc. Mas não considera etanol como um combustível a ser controlado com uma política energética, é considerado como subproduto agrícola da produção de açúcar. Usando a produção oficial de CONAB (2016a) de 30,340440 bilhões de litros para safra 2016/2017, e usando o número de 366 usinas com atuação significativa em 2016, chegamos ao valor adotado: 82,897 milhões de litros de E1G por usina significativa, equivalente a uma área de 5,1539 milhões de hectares com produtividade média de 76,12 toneladas por hectare, resultando em um total de 39,231 milhões de toneladas processados por 366 usinas significativas, resultando finalmente em 1,079 milhões de toneladas por ano por usina significativa.</p>
<p><b>Prim; Indicador; Eficiencia caldeira 90 bar :</b> valor adotado 85% (PERDONÁ, 2013 SEABRA, 2008). Outra referência cita o valor de 90% (BERNARDO NETO, 2009).</p>
<p><b>Prim; Indicador; eficiencia ciclo cogeração :</b> valores relatados variam de 68,5% a 57%, incluindo as perdas na caldeira e turbina e gerador. Valor adotado: 57%. Este valor inclui vapor de processo e eletricidade total gerada, portanto não pode ser comparado com eficiência de uma termelétrica pura.</p>
<p><b>Prim; Indicador; Eficiencia cogeração caldeira+turbina :</b> valor adotado 57% eficiência máxima em ciclo combinado incluindo vapor de processo. Só a geração elétrica tende a ficar ao redor de 40% (PINHO, 2014; TOLMASQUIM, 2016; U.S. EIA, 2016; TONON FILHO, 2013).</p>
<p><b>Prim; Indicador; eficiencia destilação :</b> valor adotado 99,6% conforme MACEDO (2004)</p>
<p><b>Prim; Indicador; Eficiencia fermentação caldo :</b> valores variando de 90% (BERNARDO NETO, 2009) a 91,1% (MACEDO, 2004). Valor adotado 91,1%.</p>
<p><b>Prim; Indicador; eficiencia lavagem cana recebimento :</b> valor adotado 99,39% segundo MACEDO (2004).</p>
<p><b>Prim; Indicador; Eficiencia motor elétrico :</b> varia de 52% em motores de muita baixa potência (abaixo de 1 HP) até 96,5% para motores de alta potência, conforme norma ABNT (GRUPO WEG, 2016a, GRUPO WEG, 2016b, GRUPO WEG, 2016c, GRUPO WEG, 2016d).</p>
<p><b>Prim; Indicador; eficiencia tratamento caldo :</b> valor adotado 99,2% segundo MACEDO (2004)</p>
<p><b>Prim; Indicador; Eficiencia turbina contrapressão + condensação :</b> varia de 75% (DIAS, 2009) A 85% (NOGUEIRA, 2008). Valor adotado 80%.</p>
<p><b>Prim; PRM Auxiliar; energia Calcário CaCO<sub>3</sub> :</b> valor adotado 1,3121MJ/kg (MACEDO 2004). Este valor provavelmente só tem a energia da mineração e beneficiamento, é semelhante aos valores de mineração de minério de ferro (entre 1,0 a 1,6 MJ/kg de minério beneficiado). precisa incluir energia de transporte até a fábrica de insumo agrícola, e energia para transporte até a fazenda.</p>

**Prim; PRM Auxiliar; fator energia motor/metal caminhão ou trator :** o motor de um veículo de carga é um produto de alta tecnologia, mais intensivo que um pneu de veículo de carga. Os requerimentos de um motor são bem maiores que os requerimentos do aço estrutural do chassi e cabine e implementos de um veículo de carga. Tem que durar pelo menos mais da metade da vida útil de um veículo (400 a 600 mil quilômetros rodados) antes de uma retífica e reforma geral, trabalhando quase o tempo todo perto da potência máxima, em condições ambientais sem proteção, e mantendo um desempenho muito perto do desempenho quando novo. É feito de metais de alta dureza, que resistam a temperaturas de combustão (700°C a 800°C), com atrito entre paredes fixas e anéis móveis e pistões móveis a uma velocidade acima de 10m/s. Usando manuais dos motores da John Deere para tratores médios (potências entre 110 e 190 HP) e motores Mercedes para caminhões médios e pesados (potências entre 110 a 200 para caminhões médios, potências entre 300 a 450 HP para caminhões pesados), os motores em média suportam 13.800 N a 20.600 N de força sobre um pistão em regime de torque máximo, no meio do curso, em média suportam força de 119.000 N a 168.000 N de força no ponto morto superior quando se inicia a combustão. A pressão média fica ao redor de 15 bar a 18 bar, e a velocidade máxima dos pistões varia de 14m/s a 16m/s enquanto a velocidade média fica ao redor de 10m/s. Usando estes dados, é calculado que um motor que dure 800.000km obriga um pistão a percorrer uma distância equivalente a 325 mil km até 383 mil km lineares, antes de precisar de uma retífica das camisas do cilindro e troca de anéis e pistões, além de troca de válvulas e retífica do cabeçote. Por estas características extraordinárias de resistência mecânica, é compreensível que os metais e componentes que compõe um motor sejam muito mais trabalhados e usem muito mais energia para a sua produção. Relacionando peso médio de um motor de um veículo ponderado com o peso teórico de um veículo ponderado, temos uma relação que é o Fator Energia, que é o fator que deve multiplicar a energia do veículo ou trator usando aço e plástico normais, levando em conta a intensidade de energia bem maior dos motores e transmissão. Valor adotado: 1,18 (multiplicar a intensidade de energia geral do veículo pelo fator para chegar à intensidade de energia incluindo o trem de força).

**Prim; PRM Auxiliar; fator F calcário (PRNT medio 80) :** PRNT é a sigla para Poder Relativo de Neutralização Total do calcáreo. A necessidade de calcário é calculado a partir de análise de solo, saturação de bases Mg, Ca, K e Al, e depois multiplicado pelo fator F para a quantidade física a ser aplicada. Valor adotado: 1,25 (aplica-se 25% a mais que o valor teórico calculado). (ALBERTON, 2012; VITTI, 2005; VITTI, 2009; VITTI, 2013).

**Prim; PRM Auxiliar; fator F gesso agricola :** valor adotado 1,00

**Prim; PRM Auxiliar; fator F K<sub>2</sub>O :** valor adotado 1,50 (VITTI, 2005; VITTI, 2009)

**Prim; PRM Auxiliar; fator F N nitrogenio :** valor adotado 2,00 para ureia (VITTI, 2005; VITTI, 2009)

**Prim; PRM Auxiliar; fator F P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** valor adotado 4,00 (VITTI, 2005; VITTI, 2009)

**Prim; PRM Auxiliar; K Potassio K<sub>2</sub>O/K :** fator adotado 1,20 (VITTI, 2005; VITTI, 2009)



<p><b>Prim; PRM Auxiliar; N nitrogenio Nitrato Amonia/N (NH<sub>4</sub>)(NO<sub>3</sub>)</b> : relação entre massa de nitrato para nitrogênio puro. Os estudos sobre necessidade de nitrogênio na adubação relatam valor de N puro, pois temos múltiplos compostos que contêm N na sua formulação, e cada composto tem suas vantagens e desvantagens, tanto econômicas como técnicas. Valor adotado 2,8571 kg/kg (cálculo do autor), ou seja, precisamos de 2,8571kg de (NH<sub>4</sub>)(NO<sub>3</sub>) para suprir a necessidade de um kg de N biologicamente disponível (incluindo fator F para o produto composto). Deve ser notado que cada composto nitrogenado tem um fator F diferente. E cada fator F é orientativo apenas, pois depende do clima, da pluviosidade local no período de aplicação, e principalmente, do resultado de análise de solo, pois boa parte do composto pode reagir inorgânicamente com os minerais do solo, com enzimas presentes, por microrganismos, antes de ser absorvido pela cana.</p>
<p><b>Prim; PRM Auxiliar; N nitrogenio Sulfato Amonia/N (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> : valor adotado 4,7143 Kg/kg (cálculo do autor)</p>
<p><b>Prim; PRM Auxiliar; N nitrogenio Ureia/N (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO</b> : valor adotado 2,1429 kg/kg (cálculo do autor). Ureia também é o composto mais barato para o agricultor, mas tem o maior fator F, tanto devido à evaporação da amônia gasosa formada espontaneamente no solo, como também é facilmente consumido por ureases residuais no solo.</p>
<p><b>Prim; PRM Auxiliar; P fosforo P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/P</b> : valor adotado 4,5831 kg/kg</p>
<p><b>Prim; PRM Auxiliar; volume E1G/dia</b> : MACEDO (2004) relata o valor de 120.000 litros/dia como a quantidade de litros de E1G produzido com a moagem diária de cana, na usina usada como exemplo típico, no seu estudo de balanço energético. Este volume parece ser muito conservador, bem menor que as médias nacionais levantadas em 2015 e 2016. A causa provável é a consolidação de usinas ao longo da última década, para maximizar rendimento e economia de escala. Os valores levantados para a safra 2015/2016 pela CONAB, indicam uma média quase tripla em relação a este valor. Este dado afeta bastante a energia indireta associada a cada litro de E1G produzido. No entanto, também afeta a energia indireta dos equipamentos de infraestrutura industrial. O número de dias úteis por safra muda de 180 (MACEDO, 2004) para 218 (CONAB, 2016). Este aumento resulta em uma melhoria dos indicadores de desempenho energéticos e uma subestimação dos indicadores de energia indireta na produção de E1G em relação aos indicadores de MACEDO (2004).</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; acido sulfurico</b> : valor adotado 9,05 grama de ácido por litro de E1G produzido consumindo 3,0982MJ/ton cana (MACEDO, 2004). Resulta no valor de 3.8596MJ/kg de ácido sulfúrico. Este valor é calculado a partir do dado de energia de ácido sulfúrico por litro de E1G produzido, recalculado para uma tonelada de cana usando a produtividade de 88,7 litros por tonelada de cana do próprio autor MACEDO (2004). O ideal é que seja relatado o valor em moles de ácido sulfúrico por litro de caldo de cana a ser purificado, mas não é encontrado este valor confiável. Além disso, deve ser notado que pelo menos uns 15 litros de etanol vem de melaço de açúcar da usina integrada, e que os químicos usados no pré-tratamento e clarificação do caldo usado na produção do açúcar não foi contabilizado. O que não é informado é a energia direta e indireta da produção e transporte do ácido sulfúrico.</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; cal</b> : usado na fase industrial para tratamento do caldo após moagem. Valor adotado 0,930kg/ton cana, conforme MACEDO (2004)</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; Calcário CaCO<sub>3</sub> por safra</b> : valor adotado 440kg/ha por safra (MACEDO 2004).</p>



<p><b>Prim; Qty Insumo; ciclohexano</b> : valor adotado 0,049440kg/ton cana conforme MACEDO (2004). O foco desta dissertação é etanol hidratado, portanto este valor não é usado.</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; gesso agrícola cana soca</b> : valor adotado 300kg/ha por safra, conforme dados reais levantados no campo, além de outras referências (KORNDÖRFER, 2002; ARAÚJO, 2015).</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; gesso agrícola como condicionador ciclo colheita</b> : é recomendado o uso entre 300kg a 600kg de gesso agrícola por hectare por safra equivalente. A massa total é aplicado de uma vez (1.500 a 3.000 kg de gesso por hectare no plantio, ou pelo menos concentrado no plantio com pequena complementação no manejo a cada colheita). valor adotado 450kg/ha/safra. (VITTI, 2005)</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; gesso agrícola como fertilizante ciclo colheita</b> : segundo KORNDÖRFER (2002) o uso de gesso agrícola equivale ao uso de 350kg/ha/safra a 250kg/ha/safra. Valor adotado 300kg/ha/safra</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; K potássio K<sub>2</sub>O cana planta</b> : valor adotado 24kg/ha/safra, pela aplicação de 120kg no plantio segundo VITTI (2013)</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; K potássio K<sub>2</sub>O cana soca</b> : segundo VITTI (2009), não é necessário o uso de potássio na cana soca. No entanto, não é claro se isso é suprido pelo uso de vinhaça no campo.</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; lubrificante</b> : valor adotado 13,37 grama de lubrificante em diversas áreas, por tonelada de cana processada, segundo MACEDO (2004).</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; N nitrogenio por colheita</b> : conforme MACEDO (2004) é necessário 30kg de nitrogênio no plantio da cana planta, com adubo formulado 5-24-24, em um total de 500kg de adubo formulado por safra, aí já incluso a massa de inerte e provavelmente fator F de cada componente. Conforme MACEDO (2004) é necessário 80kg de nitrogênio para cada safra de cana soca em um adubo formulado 16-05-24, com uma massa total de 500kg de adubo formulado por safra de cana soca. Note-se a massa de nitrogênio na cana soca é maior que na cana planta. Valor adotado: 79,5kg/ha/safra de nitrogênio elemental.</p>
<p><b>Prim; Qty Insumo; superfosfato triplo</b> : valor adotado 60kg/ha/safra resultado de levantamento de campo para fazendas na região de São Carlos/SP</p>
<p><b>Prim; Transporte; distancia fazenda adubo brasileiro</b> : valor adotado 500km. Existem muitos fabricantes de adubos formulados no Brasil. As maiores ficam perto das minas de minerais como calcáreo, fosfatos e potássio. Muitas ficam em MG, PR, SC, MS, BA, PE, PA. Cada empresa tem varias unidades fabris para minimizar custo de logística. Normalmente o minério semi-beneficiado é transportdo por via rodoviária. Mesmo com a maior parte do adubo brasileiro sendo importado (MENDES JÚNIOR, 2011; DIAS, 2006; FERNANDES, 2010; ROQUETTE FILHO, 2014), esta distância é justificada. As importações vem de países como Rússia e Canadá. As distâncias internacionais envolvidas são de 10.000 a 12.000 quilômetros, por navios graneleiros. A energia para transporte internacional não é contabilizada nesta dissertação. As principais fábricas brasileiras que usam insumos importados ficam a uns 250km em média dos grandes portos, e em média 250km das grandes fazendas consumidoras e distribuidoras regionais. Estes dados justificam a distância média de 500km de distância terrestre.</p>
<p><b>Prim; Transporte; distancia fazenda calcário</b> : a maior parte do calcário brasileiro está nas regiões cársticas de MG. Estima-se a distância de 500km entre as minas e as fazendas consumidoras, por via rodoviário. Não foram encontradas estatísticas oficiais confiáveis sobre movimentação de calcários. A maioria das fazendas da indústria sucroenergética estão longes dos parques ramais ferroviários brasileiros.</p>

<b>Prim; Transporte; distancia fazenda gesso agricola</b> : adotado o valor de 500km como distância média entre as minas de gesso agrícola em MG e os usuários agrícolas finais.
<b>Prim; Transporte; distancia fazenda K potassio importado</b> : adotado distância média de 10.000km entre Canadá e Brasil, transporte por navio graneleiro. Valor não usado na contabilização de energia total.
<b>Prim; Transporte; distancia fazenda mudas</b> : MACEDO (2004) relata uma distância de 20km entre a aplicação local e o viveiro de produção de mudas. Valor adotado nesta dissertação de 25km de distância média, transporte por meio de veículo rodoviário andando em caminhos rurais não asfaltados, com cargas típicas de até 15 toneladas por caminhão trucado, ou por meio de veículos RJ1
<b>Prim; Transporte; distancia fazenda N nitrogenio importado</b> : valor adotado 15.000 km. Energia deste transporte de importação não foi contabilizado nesta dissertação.
<b>Prim; Transporte; distancia fazenda P fosforo importado</b> : valor adotado 4.400 km
<b>Prim; Transporte; distancia média Distribuidora - Posto</b> : valor adotado 68,93km (GAMA, 2014) Energia deste transporte de importação não foi contabilizado nesta dissertação.
<b>Prim; Transporte; distância média Usina - Distribuidora</b> : valor adotado 268,35km (GAMA, 2014)
<b>Prim; Transporte; distancia usina fazenda km</b> : valores variam desde 20km (MACEDO 2004) até 52,5km (CARREIRA, 2010). A distância não pode ser muito maior que isso, por perdas e deterioração da cana durante o transporte, e porque o custo financeiro torna inviável a receita da cana para o produtor, pois a usina só paga a cana entregue no pátio da usina. Valor adotado 25km.
<b>Prim; Transporte; Payload Bi Trem</b> : valor adotado 36 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; Payload Cavalos + carreta</b> : valor adotado 29,5 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo valor adotado 36 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; Payload Cavalos trucados + carreta</b> : valor adotado 31 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; Payload RJ1 Romeu Julieta 1</b> : valor adotado 27 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; Payload RJ2 Romeu Julieta 2</b> : valor adotado 36 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; Payload Rodotrem</b> : valor adotado 48 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo valor
<b>Prim; Transporte; Payload Toco</b> : valor adotado 8 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; Payload Treminhão 9 eixos</b> : valor adotado 48 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo

<b>Prim; Transporte; Payload Trieixo</b> : valor adotado 20,5 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; Payload Trucado</b> : valor adotado 14 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Bi Trem</b> : valor adotado 57 toneladas, estimado a partir do PBT determinado pela legislação vigente e da tara média de cada classe de veículo
<b>Prim; Transporte; PBT Cavalo + carreta</b> : valor adotado 41,5 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Cavalo trucado + carreta</b> : valor adotado 45 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT RJ1 Romeu Julieta 1</b> : valor adotado 45 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT RJ2 Romeu Julieta 2</b> : valor adotado 57 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Rodotrem</b> : valor adotado 74 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Toco</b> : valor adotado 16 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Treminhão 9 eixos</b> : valor adotado 74 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Trieixo</b> : valor adotado 31,5 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; PBT Trucado</b> : valor adotado 23 toneladas, conforme legislação vigente
<b>Prim; Transporte; tara Bi Trem</b> : valor adotado 21 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Cavalo + carreta</b> : valor adotado 12 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Cavalo trucado + carreta</b> : valor adotado 14 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara RJ1 Romeu Julieta 1</b> : valor adotado 18 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara RJ2 Romeu Julieta 2</b> : valor adotado 20 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Rodotrem</b> : valor adotado 26 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Toco</b> : valor adotado 8 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Treminhão 9 eixos</b> : valor adotado 26 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Trieixo</b> : valor adotado 11 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tara Trucado</b> : valor adotado 9 toneladas, estimado a partir de catálogos de fabricantes
<b>Prim; Transporte; tempo carregamento caminhão cana</b> : valor adotado 5,515 horas conforme CARREIRA (2010). Este valor é calculado usando os dados de CARREIRA (2010) com uma média amostral de 330,9 minutos, com um mínimo de 7,0 minutos e com um máximo de 643,0 minutos.

**Prim; Transporte; tempo descarregamento caminhão cana :** valor adotado 11.477 horas conforme CARREIRA (2010). Este valor é calculado usando os dados de CARREIRA (2010) com uma média amostral de 688,6 minutos, com um mínimo de 22,0 minutos e com um máximo de 1.301,0 minutos.

**Prim; Transporte; velocidade media caminhão cana :** valor adotado 22,4km/h conforme CARREIRA (2010), com um mínimo de 11km/h e com um máximo de 71km/h.

## 7.2 A2 - Dados Secundários

A diferença entre Dados Primários e Secundários é que os dados secundários podem ser calculados a partir de dados Primários e/ou de outros Secundários. Muitas vezes um dado intermediário é calculado e tabelado como dado secundário porque é usado múltiplas vezes em diversos componentes do vetor energia de várias atividades. Esta prática não só economiza tempo, evita erros, como permite fácil estudo de cenários ao alterar somente uns poucos dados intermediários. Dados Secundários segue a mesma classificação que os dados primários. Dados secundários normalmente não tem referências externas, exceto para fins de verificação de consistência.

**Sec; Ambiental; Energia Solar Anual no solo :** energia em MJ por metro quadrado por colheita. Foi usado valor de TSI = 1361W/m<sup>2</sup> médio (KOPP 2011), que resulta em 173,5W/m<sup>2</sup> no solo (já levando em conta perda na atmosfera, reflexões, irradiações, período noturno) mas sem cobertura de nuvens ou oclusão por chuvas. O valor final é de 6.571,3MJ/m<sup>2</sup>/colheita. Para fins de comparação, usando dados de 2016 (CONAB, 2016a) temos uma produtividade de 76,9 toneladas de cana por hectare, 76,3 litros de etanol por tonelada de cana, resultando em uma produtividade líquida de 5.867,5 litros por hectare, cada litro de etanol hidratado contendo 20,968MJ de energia, que se traduz em  $1,230 \times 10^5$  MJ/ha, equivalente a extrair apenas 0,3899W/m<sup>2</sup> de energia solar. Ou seja, aproveitamos apenas 1/445 da energia solar disponível sem cobertura de nuvens. A produção real de biomassa é bem maior, pois boa parte da energia ficou na massa radicular, nas folhas, no bagaço, e no palhico que ficou no campo.

**Sec; Energia Indireta; consumo diesel uso Torta Filtro :** baseado nos dados de MACEDO (2004) relatando consumo de 9,6 litros de diesel por hectare. Valor adotado 34,035MJ/ha. MACEDO (2004) assume que 30% do terreno tem aplicação de torta de filtro, usando um caminhão com 8 toneladas de carga, conseguindo um rendimento de 2,5km/litro de diesel. A distância média percorrida na aplicação é de 8km, com o uso de 12 toneladas de torta de filtro (base úmida) ou 5 toneladas de torta de filtro (base seca). O uso de 9,6 litros de diesel é justificado por cada viagem/aplicação consumir 16km de trajeto (ida e volta). Como 12 toneladas de carga exigem 1,5 viagens, temos um trajeto teórico de 24km. Com consumo de 2,5km/litro, temos um consumo de 9,6 litros de diesel. Temos somente energia direta, precisa incorporar toda a energia indireta usando os parâmetros para cálculo da energia total de entrega de cana para usina. Usar apenas 9,6 litros permite um EROI erroneamente otimista. Nesta dissertação a energia de uso de torta de filtro não foi considerado.

**Sec; Energia Indireta; consumo diesel uso Vinhaça :** baseado nos dados de MACEDO (2004) relatando consumo de 24,7 litros de diesel por hectare. Valor adotado 875,69MJ/ha. MACEDO (2004) assume que usa 3 métodos diferentes para aplicação da vinhaça, com uso desigual entre os meios de aplicação (caminhão com aspersão direta, canal com aspersão por bomba, caminhão e distribuição por meio de rolo ou mangueira caminhante). Também não está com energia indireta dos equipamentos usados. Não foi relatado por MACEDO (2004) movimentação da vinhaça da usina até a fazenda (rodoviária ou dutoviária), e sua energia total demandada. Nesta dissertação a energia de aplicação de vinhaça não foi considerada.

**Sec; Energia Indireta; consumo energia defensivo agricola sem diesel :** energia direta usada na produção de defensivos agrícolas. MACEDO (2004) informa valor de 2,88Mcal por tonelada de cana. infelizmente este dado é dependente da produtividade relatado pelo autor (88,7 toneladas por hectare). Usando estes dados de MACEDO (2004) foi calculado o valor de 993,58MJ/ha. Se a necessidade de defensivos for proporcional à massa de cana colhida, resulta em 811,50MJ/ha com produtividade menor relatado por outros autores. Usando dados de alguns autores que relatam valores de 355MJ/kg a 452MJ/kg (SEABRA, 2008; ALMEIDA, 2007; DÍAZ, 2010) para defensivos agrícolas como herbicidas e inseticidas, e com valores médios fornecidos em planilhas reais de usinas em 2015 (1,733kg/ha e 1,835kg/ha), o valor adotado é de 1.266,6MJ/ha. Se a aplicação de defensivos agrícolas for estritamente relacionado com a área, independentemente da planta sendo protegida, então o valor de energia é de 993,58MJ/ha. Os valores de MACEDO (2004) e os cálculos do autor são compatíveis (1.266 versus 994), dentro das amplas margens de variação típico de atividades agrícolas.

**Sec; Energia Indireta; energia pneus caminhão ponderado :** foi montado um caminhão fictício, considerado representativo pelo autor, do transporte em larga escala de massa de baixo valor agregado (como cana, adubos agrícolas, calcareo, etc), composto de uma média de cavalo simples com carreta trieixo, carreta trucado com carreta trieixo, RJ (romeu e julieta com julieta com eixos simples e duplos) e rodotrem. Resultou em uma média de 27 pneus por cada veículo de carga ponderado. Adotando uma vida média de 800.000km por veículo de carga, adotando uma média de 80.000km por pneu original, adotando duas recapagens por pneu, adotando um valor de energia de pneu recapado quase metade da energia de um pneu novo, resultou em energia equivalente a 4 jogos de pneus novos na vida útil de um veículo de carga fictício ponderado. Estes números são muito conservadores, assume o uso de pneus de alta qualidade, recapagem em empresas credenciadas pelo fabricante original, e uma energia muito menor usada em recapagem contra energia de um pneu novo. E assume implícitamente que não existe sobrecarga no peso por caminhão, embora na prática isso seja usual, principalmente entre fazendas e usinas, em trechos que não tem balança rodoviária para controle de peso por eixo. O valor adotado é de 502,71GJ/veículo, resultando em 0,628MJ/km rodado. (cálculo do autor)

**Sec; Energia Indireta; energia Ureia nitrogenio (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO :** Uréia provavelmente é o adubo nitrogenado mais barato no Brasil, e ao mesmo tempo é o insumo agrícola com a maior energia indireta (exceto outros nitrogenados). O processo de produção é baseado na formação da amônia, para depois produzir a uréia propriamente dito. Amônia é formado por nitrogênio e oxigênio. Nitrogênio vem do ar, por processos como PSA<sup>1</sup> (Pressure Swing Adsorption) e filtração por membranas<sup>2</sup>. Separação por destilação criogênica<sup>3</sup> pode ser usada quando existe interesse em outros gases atmosféricos. MACEDO (2004) usa o valor de 61,546MJ/kg de N (nitrogênio elementar) mas não informa que nitrogenado foi usado como referência (uréia, nitrato, sulfato). Como a energia de produção é diferente para cada nitrogenado, este valor no máximo é uma estimativa, não um valor referencial a ser usado. SOUZA (2010) relata o valor de 70MJ/kg de nitrogênio, dado retirado do software Simapro, mas também sem detalhes do nitrogenado usado, ou se a energia é referente somente à produção do nitrogênio elementar. SAYGIN (2009) na Tabela 1, relata que com BPT (Best Practice Technology) a produção de uréia usa 31,90MJ/kg de amônia, ainda faltando a energia para produção da uréia propriamente dita. WORRELL (2000) informa que é usado entre 28MJ/kg a 40MJ/kg só para a produção de amônia, um dos insumos para a produção da uréia. MENDES JÚNIOR (2011) relata a grande dependência brasileira da importação de matéria-prima para produção de adubos agrícolas. Com detalhamento das fontes de dados e um diagrama detalhado, mostra uma intensidade de energia de 112,117MJ/kg de uréia, não de N elementar. Portanto ainda tem que multiplicar pelo fator Uréia/N (2,1429) chegando finalmente ao valor de 240,256 por kg de N elementar necessário. valor adotado para uréia: 112,117MJ/kg. Deve ser lembrado que este valor não inclui energia de produção de eletricidade, energia de produção de gás natural, energia de produção de nafta, transporte de gás natural e nafta até a fábrica de adubo, energia de transporte da uréia até a fazenda. Maiores detalhes do processo produtivo e energias intermediárias podem são encontrados na seção 2.14 (Nitrogenados: uma atenção especial).

**Sec; Energia Indireta; Energia vapor kWh eq :** um dado problemático em termos de qualidade de dado, é a necessidade de vapor de processo usado na usina na Fase Industrial. Praticamente todos os autores quantificam a necessidade em quilogramas de vapor por tonelada de cana processada, porém sem qualificar o vapor com as propriedades Pressão e Temperatura, ou pelo menos duas propriedades termodinâmicas que permitam especificar completamente o vapor, para ter a energia necessária quantificada. Sem esta definição mais rigorosa, fica muito difícil estimar a energia excedente que pode ser alocada como coproduto. A energia excedente relatada pela

<sup>1</sup> Processo de separação de gases misturados, por meio de adsorção de um componente da mistura sob pressão de acordo com a afinidade com um material adsorvente, como zeólitos, carvão ativado, membranas moleculares. É realizado praticamente à temperatura ambiente, e depois o material adsorvente volta à baixa pressão para liberação da fração retida. É um processo recorrente até que se obtenha a pureza desejada. Neste caso específico, a corrente gasosa é reciclado e passa pelo mesmo processo repetidamente. É vantajoso para produção local de baixos volumes de nitrogênio gasoso.

<sup>2</sup> Filtração por membranas usa membrans moleculares que permitam separar um componente de uma mistura sob muita alta pressão, ao permitir moléculas de tamanho específico passarem para o lado de baixa pressão da membrana. Ou o componente desejado ser retido no fluxo de alta pressão. É necessário passar os fluxos enriquecidos e depletados por mais membranas refinando o processo de separação até a pureza desejada. Adequado para altos volumes de produção e exige maquinarias complexas e de alta potência.

<sup>3</sup> Processo onde se liquefaz o ar todo, para depois usar destilação fracionada do ar líquido. É menos eficiente energeticamente, porém compensa se deseja obter oxigênio líquido e nitrogênio líquido para outras aplicações industriais.

literatura varia muito, desde 5% até quase 50%. Um autor (CORTEZ, 2016) relata que a energia excedente, na forma de bagaço, chega a 78% (setenta e oito por cento). Esta energia excedente, como coproduto, entra como crédito de energia no balanço energético, afetando muito EROI calculado. Somente ZAMPIERI (2005) fez um estudo focado em termodinâmica, estudando alternativas de condições PT em caldeiras diversas e rendimento termodinâmico. Relata o valor de 330kwh por tonelada de cana. Usando cálculo reverso, a partir do percentual de energia excedente de vários autores, usando a média de ATR da CONAB (2016), assumindo que no futuro todas as usinas já estão adaptados para caldeiras de 90 bar com temperaturas de 520°C, adotando uma perda de energia durante a cogeração de energia elétrica, e com as melhores práticas, chega-se a um valor de 352kwh por tonelada de cana (cálculo do autor). Rendimento termodinâmico de energia varia conforme a tecnologia usada na caldeira para queima, mesmo mantendo as condições PV de combustão. Além disso, a umidade do bagaço não é controlado e a maioria dos autores não informa a média de umidade. Todos estes fatores afetam muito o valor da energia disponível no bagaço de cana, com consequente aumento da incerteza do EROI final. Valor adotado 352kWh por tonelada de cana processada.

**Sec; Energia Indireta; vida caminhão/pneu :** a vida útil de um veículo de carga supera bastante a vida útil de um pneu. Usando os dados de 800.000km para a vida útil de um veículo de carga pesado, e 80.000km para a vida útil média de m pneu neste veículo, temos uma média de 10 pneus para cada posição deste veículo durante a sua vida útil. Usando o dado de 2 recapagens por pneu novo, temos uma média de 240.000 para cada pneu novo. Assim, precisa-se no máximo de 4 jogos de pneus novos para a vida útil de um veículo de carga pesado. Esta aproximação otimista é usado com cautela, visto que é normal o excesso de peso em um veículo quando usado na indústria sucroenergética, além do fato de rodar parte do tempo em vias não asfaltadas. Os dados de vida útil são estimados para veículos rodando dentro dos parâmetros legais e em vias pavimentadas. Valor adotado: 4 jogos de pneus na vida útil de um veículo de carga pesado.

**Sec; Indicador; Energia Solar/Energia E1G :** este indicador mostra o quanto realmente aproveitamos a energia solar incidente no solo para conversão final em E1G como energia “primária”, no lugar de energia fóssil como petróleo, carvão e gás natural. O valor calculado é a energia solar na superfície do solo, pelo ciclo de 6 anos, rateado por 5 colheitas. Usando o valor de 173,5W/m<sup>2</sup> para TSI médio no equador, 86.400 segundos por dia, 365,25 dias por ano, aproximadamente 76,9 para produtividade de cana por hectare e 76,3 como rendimento médio de E1G por tonelada de cana, e usando o valor de 20,97MJ/litro de E1G, o valor calculado é de 444,96. Ou seja, para 444,96J de energia solar disponível, aproveitamos apenas um Joule. Este valor influencia diretamente a métrica em W/m<sup>2</sup>eq, para comparar com eficiência de aproveitamento da energia solar por outras tecnologias renováveis como fotovoltaica, CSP e eólica. Valor adotado 444,96.



**Sec; PRM Auxiliar; consumo Transbordo :** transbordo é a atividade de transportar a cana cortada pela colheitadeira até o local de expedição para a usina. Normalmente um veículo de transbordo, como um RJ, acompanha a colheitadeira de perto, para recolher a cana recém cortada nas caçambas abertas. Normalmente a cana cortada é jogada em uma fileira lateral ao lado da fileira por onde passa a colheitadeira. Temos duas técnicas para o recolhimento físico da cana cortada. Uma é usar um conjunto de transbordo (carreta aberta rebocado por trator dedicado, de média potência) ou um conjunto RJ (caminhão trucado rebocando um reboque com 3 ou 4 eixos duplos), ambos vindo logo atrás da colheitadeira, em parceria com uma máquina carregadeira. Esta máquina carregadeira, uma pá mecânica especificamente projetada para pegar cana cortada no solo e jogar na caçamba, tem motor de baixa a média potência, com uns 150HP, com garras acionadas hidráulicamente (ver Figura 7-1). Esta técnica de vir depois da colheitadeira permite grande flexibilidade de uso de equipamento e capacidades variadas, enquanto maximiza a produtividade da colheitadeira, que funciona em regime de colheita contínua. A segunda técnica é o uso de um equipamento de transbordo sincronizado fisicamente (com distância e posicionamento cuidadosamente controlado em relação à colheitadeira). Isso exige uma automação completa, com sensores montados na colheitadeira, comunicação constante entre os operadores da colheitadeira e transbordo. A vantagem é a minimização de perda de açúcares por tempo decorrido depois da colheita, e menos material estranho na cana colhida. A desvantagem é o custo do investimento, problemas de sincronia física de equipamentos, e problemas de sincronia temporal entre colheitadeira e transbordo. Quando um conjunto de carga enche, tem que esperar vir outro conjunto de carga, posicionar corretamente, para então continuar a operação de colheita/carga. Além disso, existe o risco de diminuir a densidade da carga, por falta de alinhamento dos toletes ou colmos. Nesta dissertação, é adotado o uso de um conjunto RJ. MACEDO (2004) relata um consumo direto de 21,2 litros por hectare para transbordo além de 12,7 litros por hectare para carregamento, com uma produtividade de 35 toneladas por hora de carga, com 82,4 toneladas por hectare de cana plantada, e consumo de 9 litros de diesel por hora de carregamento para um RJ, com consumo de 1,6km/litro carregado, consumo de 2,2km/litro vazio, distância de 20km. Usando o consumo específico<sup>1</sup> de 0,233 litros de diesel por HP.hora. Com potência do motor de 150HP, trabalhando a meia carga, com carga máxima de de 37 toneladas por RJ, com velocidade de trabalho de 5km/h, produtividade da colheitadeira de 2 horas por hectare, com cada hectare produzindo 76 toneladas de cana (CONAB 2016), temos um consumo calculado de 34,99 litros por hectare. Valor adotado 35 litros por hectare para operação de carregamento. Adotando a distância média de 20km para levar a carga cheia até a área de expedição, assumindo que a velocidade de movimentação é de 20km/hora (não tem que acompanhar a colheitadeira na velocidade de colheita), com um consumo de 1,6km/litro quando carregado, e um consumo de 2,2km/litro quando vazio, e que temos duas viagens completas por hectare, temos que acrescentar ainda um consumo de 43,2 litros. Total adotado para operação completa de carregamento+transbordo: 78,17 litros/hectare. (Cálculo do autor).

<sup>1</sup> Equivalente a um rendimento termodinâmico de 32,03% da energia de 35,43MJ/litro de combustível diesel médio. Valor calculado pelo autor a partir de dados de consumos específicos de combustível, divulgados em catálogos de vários fornecedores de motores diesel para serviço pesado, na faixa de 100 a 450 HP

**Sec; PRM Auxiliar; consumo Transporte cana :** transporte de cana colhida da fazenda até a usina é feita com vários tipos de veículos de carga, cada um com o seu custo de energia direta. Usando um caminhão trucado, MACEDO (2004) relata um consumo específico de 0,0303 litros/km.tonelada, usando um caminhão RJ relata um consumo específico de 0,0223 litros/km.tonelada, usando rodotrem relata um consumo específico de 0,0185 litros/km.tonelada e usando um treminhão relata um consumo específico de 0,0157 litros/ton.km. A média ponderada por uso de tipo de veículo resulta em um consumo específico de 0,0204 litros/km.tonelada (MACEDO, 2004). Valor adotado: 0,04472 litros/km.tonelada. distância adotada: 25km bidirecional, calculado a partir de um consumo ponderado de 1,5428km/litro para uma carga ponderada de 34,5toneladas por viagem em distâncias de 25km por viagem entre usina e fazenda. A grande diferença é que MACEDO (2004) só usou 20km e viagem unidirecional (ida sem volta do caminhão).

**Sec; PRM Auxiliar; energia aplicação mudas :** as mudas são produzidas usando o mesmo ciclo que a produção normal. Adotando a média de 12 toneladas de mudas por hectare, para uma produtividade de 76,9 toneladas por hectare (CONAB 2016a), para um ciclo de 5 colheitas por cana planta, temos uma proporção de 3,1209% da energia total a ser apurada como entrada, no fim do balanço energético. MACEDO (2004) relata um valor de 124,55MJ por hectare de mudas. Valor adotado: 3,5% da energia total da produção da cana-de-açúcar.

**Sec; PRM Auxiliar; energia total caminhão :** A energia total calculado para um caminhão ponderado (caminhão fictício com peso e capacidade média, resultado do conjunto de veículos de carga diferentes usados na indústria sucroenergética). Os dados primários adotados para este cálculo são: energia por kg de aço 62,8MJ/kg; energia de fabricação 22,54MJ/kg; peso de um caminhão ponderado 18.000kg; peso de motor de 449,4kg; peso de conjunto de transmissão 330kg; intensidade de energia de motor e transmissão de potência quatro vezes a energia do aço simples; fator de manutenção 60,7% (ao longo da vida útil do trator, a manutenção intensiva equivale ao uso de 60,7% da energia usada para produzir um veículo novo). A energia e vida útil dos pneus é bem diferente dos tratores. Cada pneu tem uma vida útil de aproximadamente 80.000km quando usado em vias asfaltadas. Cada pneu de boa qualidade admite duas recapagens com segurança técnica e com durabilidade equivalente a de um pneu novo. O número de pneus varia bastante conforme a configuração do veículo combinado de carga, para a mesma potência de motor e de tração. Desta maneira, durante a vida útil de um caminhão em vias asfaltadas, temos que usar 3,35 jogos completos, arredondado para 4 conjuntos, com a energia de recapagem de 47,89MJ/kg bem menor que a energia de produção de um pneu novo, usando 84,63MJ/kg. Cada pneu de caminhão tem uma massa de 55kg. Um caminhão ponderado com os cinco veículos mais usados (cavalo com carreta trieixo, carreta trucado com carreta trieixo, RJ1, RJ2, bitrem) tem 27 pneus. A energia dos pneus deste veículo de carga ponderada é de 502,71 GJ/veículo para a vida útil do veículo. A energia total calculada é de  $1,8536 \times 10^6$  MJ/veículo. Com uma vida útil estimado em 800.000km quando usado em vias asfaltadas, ou uma vida útil semelhante ao de um trator quando usado exclusivamente em condições fora-de-estrada. temos os dados auxiliares de uma energia indireta de 331,25 MJ/hora de caminhão ponderado. Em uso rodoviário, temos um indicador de 4,141MJ/km rodado em vias pavimentadas. Usando o peso médio de um caminhão ponderado, temos uma intensidade de energia de 184,03 MJ/kg. Estes valores calculados já incluem energia do aço, da produção do veículo, dos pneus, energia do motor e transmissão, e manutenção. Resumo dos valores adotados: 4,141MJ/km rodado, 184,03MJ/kg de caminhão, 331,25MJ/hora de caminhão usado no campo.

**Sec; PRM Auxiliar; energia total implemento :** um implemento agrícola não é mais um simples objeto passivo, como um antigo arado de tração animal. Os implementos modernos são verdadeiros sistemas, com subconjuntos trocáveis para maximizar a especialização para um determinada tarefa. Os implementos modernos são ativos, geralmente acionados por conexões hidráulicas ao trator, embora ainda tenha alguns com acionamento mecânico pela tomada de força do trator. A vantagem do acionamento hidráulico é maior liberdade de movimentos das partes móveis do implemento, além de permitir curvas muito fechadas do conjunto trator+implemento. Por isso, os tratores modernos tem tomada de força mecânica e tomada de fluido hidráulico, e as especificações de tratores modernos incluem a capacidade de bombeamento de fluido hidráulico, em litros por minutos a uma determinada pressão de trabalho. Usando catálogos de fornecedores de implementos, é calculado que o peso médio de um implemento agrícola com acionamento ativo é de 4.505 kg (SANTA IZABEL IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS, 2010). O aço usado na sua produção é aço de alta resistência, geralmente forjado e endurecido com tratamento térmico específico, com uma energia indireta mais alta que a média usada em tratores e caminhões, com um valor de 117,23MJ/kg, pois tem que ter dureza e resistência extrema à abrasão do solo e umidade, além de trabalhar em pH baixo. A energia de fabricação é a mesma de tratores e caminhões. O fator de manutenção também é mais alto que os de tratores e caminhões, pois está sempre fazendo esforço máximo em atrito com solo abrasivo e corrosivo, com um fator de 0,926 (92,6% da energia inicial ao longo da vida útil de 8 anos ou 8.000 horas) (MACEDO, 2004). A energia total de um implemento ponderado é de  $1,2127 \times 10^6$  MJ/implemento ponderado. Que resulta em uma intensidade de energia de 151,59MJ/hora de trabalho. Ou 269,20MJ/kg de implemento.

**Sec; PRM Auxiliar; energia total trator :** a energia indireta pelo uso de um equipamento pesado e complexo como um trator é maior que a energia direta do diesel usado. A energia total calculado para um trator ponderado (trator fictício com peso e capacidade média, resultado do conjunto de tratores diferentes usados no cultivo da cana). Os dados primários adotados para este cálculo são: energia por kg de aço 62,8MJ/kg; energia de fabricação 22,54MJ/kg; peso de um trator ponderado 5.249,5kg; peso de motor de um trator médio 449,4kg; peso de conjunto de transmissão completa tração 4x4 com TDA<sup>1</sup> e acoplamentos para tomada de força e bombas hidráulicas para implementos 660kg; intensidade de energia de motor e transmissão de potência em relação ao aço simples de carroceria 4 vezes; fator de manutenção 89% (ao longo da vida útil do trator, a manutenção intensiva equivale ao uso de 89% da energia usada para produzir um trator novo) (MACEDO, 2004); energia quatro pneus de trator (assumindo otimisticamente que durem a vida útil do trator) 155.236MJ. A energia total calculada é de  $1,5637 \times 10^6$  MJ/trator. Com uma vida útil estimado em 6.000 horas de trabalho, temos os dados auxiliares de uma energia indireta de 260,62MJ/hora de trator ponderado. Usando o peso médio de um trator ponderado, temos uma intensidade de energia de 297,88 MJ/kg. Estes três valores calculados já incluem energia do aço, da produção do trator, dos pneus, da maior intensidade de energia do motor e sistema de força, a manutenção do trator ao longo dos anos de vida.

<sup>1</sup> TDA Tração Dianteira Auxiliar para tratores, onde as rodas dianteiras tem tração também, ajudando tanto o direcionamento preciso, como também para minimizar compactação do terreno com a pressão passiva dos pneus dianteiros.

**Sec; PRM Auxiliar; gesso agrícola por safra (0,18\*P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,16\*Ca 0,08\*S) :** gesso agrícola é produzido pela reação de ácido sulfúrico com rocha fosfatada, resultando além do gesso, ácido fosfórico e ácido fluorídrico. A reação é  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 10\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{OH}_2\text{O} \equiv 10\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}_3\text{PO}_4 + 2\text{HF}$ . Segundo ALBERTON (2012) temos uma média de 4,5 toneladas de gesso agrícola para cada tonelada de ácido fosfórico. No entanto, ao realizar os cálculos estequiométricos, temos as seguintes relações de massas: 58,57 kg de  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 56,97\text{kg}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4 + 20,93\text{kg}$  de  $\text{H}_2\text{O} \equiv 100\text{kg}$  de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 34,15\text{kg}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + 2,32\text{kg}$  de HF. Portanto para cada 100 kg de gesso agrícola produzido, temos que incorporar a energia de produção de 56,97kg de ácido sulfúrico. Segundo MACEDO (2004) cada kg de ácido sulfúrico tem uma energia indireta de 3,8596MJ/kg de ácido sulfúrico, resultando em 2,1988MJ/kg mais a energia necessária para a mineração e transporte até o local de produção. A mineração de gipsita é semelhante à mineração de minério de ferro, então podemos estimar em 1MJ/kg a energia embutida na mineração da gipsita, acrescida da energia para desidratação antes de ser utilizada como insumo primário para produção de gesso agrícola. ROLIM (2012) relata a necessidade teórica de 0,154 Mcal/kg de gipsita, em fornos cuja eficiência varia de 4% (fornos alimentados com madeira, abertos, altamente ineficientes, usados em extrativismo primitivo por microprodutores, até rendimentos de 32% com fornos otimizados para tal tarefa. Assumindo a melhor prática, é necessário um mínimo de 0,4813MJ/kg para secagem, além da energia da mineração e transporte até a área de secagem, para depois ser transportada até a produção de gesso agrícola. Geralmente esta planta também fabrica ácido fosfórico. PALACIOS (2011) relata uma energia de 1,6MJ/kg de minério de ferro, já beneficiado (concentrado e peletizado ou sinterizado) mas ainda sem energia de transporte até a usina de aço. DOE (2003) relata 0,087MJ/kg de minério de ferro, e CIPEC (2005) relata a necessidade de 0,12MJ/kg de minério. Diante destes valores tão discrepantes, nesta dissertação adota-se o valor de 1,0MJ/kg de minério de ferro beneficiado, na mina ainda. Juntando os dados, temos um mínimo de 1,0MJ (minério de gipsita minerado) + 0,48MJ (secagem gipsita) + 2,20MJ (ácido sulfúrico) resultando em uma energia mínima de 3,68MJ/kg de gesso agrícola, ainda na porta da fábrica. Valor adotado: 3,68MJ/kg.

**Sec; PRM Auxiliar; NEYR petróleo :** produção de combustíveis fósseis, derivados do petróleo, tem o seu custo energético. Usando o ciclo completo que vai de exploração, descoberta, perfuração, extração, transporte para refino, refino, distribuição, temos algumas estimativas na literatura de aproveitamento de apenas 50% da energia primária estocada no subsolo (CUNHA FILHO, 2009). Com o caso do petróleo brasileiro, onde uma fração significativa já é extraído do pre-sal, e no cenário futuro, provavelmente a totalidade terá que vir de pre-sal ou outros locais semelhantes, o autor estima um NEYR de 0,40 (apenas 40% da energia total do petróleo no subsolo é disponível como óleo diesel refinado e distribuído). Valor adotado 0,40.

**Sec; PRM Auxiliar; payload ponderado caminhão cana/insumos bulk :** é estimado usando uma média da carga útil (payload) de 5 veículos de carga: cavalo e carreta triexio, cavalo trucado e carreta triexio, RJ1 (Romeu e Julieta tipo 1, com Julieta com 1 eixo duplo dianteiro e 2 eixos duplos em tandem na traseira), RJ2 (Romeu e Julieta tipo 2, com 2 eixos em tandem na dianteira da Julieta), e rodotrem. Valor adotado 34,5 toneladas de carga útil, dentro da lei. Este parâmetro facilita o cálculo de energia total de movimentação de insumos agrícolas.

**Sec; PRM Auxiliar; peso medio caminhão :** peso médio de um caminhão fictício, combinando os mesmos 5 veículos de carga usados para estimar “payload” ponderado. Valor adotado 27.320 kg de tara (peso em ordem de marcha sem carga).

**Sec; PRM Auxiliar; peso medio implemento :** usando as especificações de implementos agrícolas do fornecedor SANTA IZABEL IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS, para uso em gradagens, variando o peso de 2900kg e tracionados por trator de 140HP, até o peso de 6630kg, tracionado por trator de 320HP. O peso médio é estimado em 4.505kg.

**Sec; PRM Auxiliar; peso medio trator :** usando folhetos com especificações de tratores agrícolas das empresas John Deere, Massey, Valtra e New Holland, vemos que tratores tem pesos muito variados, conforme a classe de potência. Tratores com motores até 100HP tem pesos entre 3 toneladas a 4 toneladas. Tratores com motores entre 100 a 200 HP tem pesos entre 4 toneladas a 7 toneladas. Tratores com motores entre 200 a 300 HP tem pesos entre 6 toneladas a 10 toneladas. Tratores com motores acima de 300 HP tem pesos acima de 9 toneladas até mais de 20 toneladas, quando equipados com esteiras metálicas. Nesta classe também estão as colheitadeiras, geralmente com motores acima de 300HP, com pesos entre 15 toneladas a 22 toneladas. Na agricultura sucroenergética, a maioria das tarefas é feita com tratores de 100 a 200 HP, exceto as colheitadeiras e os tratores de transbordo. Usando as informações dos sites destes quatro fornecedores, é estimado um peso médio (em ordem de embarque, não em ordem de marcha) de 5.250kg por trator. Este valor não é exato, e deve ser ponderado pelo uso em horas de cada trator em cada atividade. Não existe nenhuma estatística sistemática de uso de cada trator por atividade nas fazendas, portanto, existe um potencial de larga margem de erro nesta estimativa. No entanto, é coerente com outros autores que estudam aplicação de tratores e energia indireta na indústria de agroenergia. Segundo SOUZA (2010), que lista vários tratores com seu peso, a média fica em 5.499 kg. Valor adotado: 5.250kg/trator

**Sec; PRM Auxiliar; tara ponderada caminhão cana/insumos bulk :** calculado como a média dos 5 veículos de carga padronizados, cada tara (ou peso sem implementos e carga útil) retirado de catálogos de diversos fabricantes. Valor adotado 18.000kg por veículo fictício ponderado.

**Sec; PRM Auxiliar; W/m2 E1G :** adotando a produtividade de biomassa com 76,9 toneladas por hectare, e com rendimento de 76,3 litros de E1G por tonelada de cana, temos um total de 5.869,4 litros de D1G por hectare. Usando a constante de 20,97MJ por litro de E1G hidratado, temos um total de 123.069MJ como energia útil produzida por um hectare. Neste total não está contabilizado a energia elétrica excedente, que de um modo geral é menos que 10% da energia do etanol produzido. Este percentual varia um pouco conforme as hipóteses adotadas de cogeração e composição da biomassa. Rateando esta energia total por 365,25 dias e por 86.400 segundos do dia, temos uma taxa equivalente de 0,390W/m2 contínuo. Comparado com TSI na superfície do solo, de 173,53W/m2, vemos que estamos aproveitando apenas 1/445 a energia total do sol que chega ao solo.

### 7.3 A3 - Tratores, Implementos e Veículos

Tratores são veículos especiais cuja função é semelhante a de um cavalo mecânico: fornecer tração. Além disso, devem ter uma tomada de força para acionar mecanicamente um implemento agrícola passivo. E finalmente, muitos devem ter uma tomada de fluido hidráulico para acionamento de outros implementos como carregadores de cana ou movimentadores de bagaço e palhico. São projetados para fornecer muita tração para reboque de implementos agrícolas e caçambas sem motorização, a baixa velocidade. A velocidade típica de produção é de alguns quilômetros por hora apenas. Os motores são a diesel, operam quase o tempo todo perto da potência máxima, a baixa rotação (pouco mais que 2.000 RPM). As potências variam desde dezenas de HP até quase 400HP. As menores são para tração de implementos leves, as maiores são para tração de caçambas com dezenas de toneladas para transbordo de cana dentro da fazenda. Ou arrasto de implementos de preparação de terreno como aração e gradagem pesada. Colheitadeiras são combinados de vários implementos, cada uma com uma função específica, combinando uma sequência de operações com a cana. Corta a ponta, limpa as folhas, deita parcialmente para alinhamento e corte bem rente ao solo, corta colmo em toletes, alinha os colmos ou toletes antes de descarregar, joga palha e pontas no campo a uma distância apropriada, enfim, é uma linha de montagem completa autopropelida. Normalmente a potência dos motores vai de 300HP a 400HP, sendo a potência mais comum ao redor de 350HP. O peso de uma colheitadeira varia usualmente entre 15 toneladas a 22 toneladas, mas existem colheitadeiras pesando somente 10 toneladas. Podem ser com pneus ou com esteira. Uso de esteira diminui a compactação do solo e maximiza tração, mas custo inicial e manutenção são mais caros.

Tratores satisfazem um requisito especial, compactar o mínimo possível o solo ao passar. Para isso, usam pneus enormes, com grande área de contato e baixa pressão de ar, nos pneus de tração. Está ficando corrente o uso de tratores com tração dianteira auxiliar, para diminuir a necessidade de lastro nos pneus traseiros e minimizar compactação do solo. Para permitir melhor tração em solo escorregadio, é normal tratores usarem lastro líquido dentro do pneu de tração. O peso de um trator pode variar de 4 a 5 toneladas até mais de 10 toneladas, dependendo dos acessórios e implementos acoplados ou integrados. Tratores típicos usados em fazendas de cana-de-açúcar estão sumarizados na Tabela 7-1.

**Tabela 7-1 Tratores e caminhões típicos em fazenda de cana-de-açúcar**

	Equipamento	Descrição	Produtividade	Consumo litros/hora
1	MF 290 78	Carreta distribuidora de calcário	1,61 ha/hora	6,0
2	CAT D-6 165	Grade pesada 18 D x 34"	1,30 ha/hora	27,6
3	CAT D-6 165	Subsolador de 5 hastes 1,00	26,0 ha/hora	
4	CAT D-6 165	Grade pesada 18 D x 34"	1,35 ha/hora	27,6

5	Valmet 1780 165	Grade leve 48 D x 20"	1,60 ha/hora	15,0
6	MF 680 170	Sulcador adubador duplo	1,10 ha/hora	15,0
7	MF 275 69	Carreta para plantio	0,60 ha/hora	4,0
8	MF 275 69	Cobridor de cana de 2 linhas	1,80 ha/hora	4,8
9	MF 275 69	Bomba de herbicida	2,50 ha/hora	4,0
10	MF 292 104	Cultivador para quebra do meio	1,30 ha/hora	8,0
11	MF 275 69	Aleirador de palha	1,50 ha/hora	4,0
12	Valmet 1580 143	Cultivador tríplice operação	1,30 ha/hora	9,2
13	Valmet 1580 143	Eliminador mecânico de soqueira	1,10 ha/hora	12,2
14	Case A-7700 330	Colhedora de cana combinada	45,0 ton/hora	40,4
15	MF 290 RA 78	Carregadora de cana	46,0 ton/hora	7,1
16	MB 2318 180	Transp. de cana (truck = 8%)	2,2 km/l	-
17	MB 2325 250	Transp. de cana (RJ = 25%)	1,6 km/l	-
18	Volvo 360	Transp. de cana (trem./rodot. = 67%)	1,2 km/l	-
19	MB 2318 180	Basculante	2,5 km/l	-
20	MB 2213 130	Carroceria transporte de adubo	2,5 km/l	-
21	MB 2318 180	Transporte de vinhaça (truck)	2,2 km/l	-
22	MB 2220 200	Transporte de vinhaça (RJ)	2,0 km/l	-
23	Volvo 360	Transporte de vinhaça (rodotrem)	1,3 km/l	-
24	Motobomba 120	Aplic.de vinhaça (aspersão/cam. aspersão)	120 m <sup>3</sup> /h	14,0L/h
25	Valtra BH 180 180	Reboque de julieta/transbordo	35,0 ton/hora	9,0L/h

Fonte: MACEDO (2004)

Implementos agrícolas (PINTO, 2002) são muito variados, cada uma com uma função específica. Podem atuar diretamente no solo por arrasto, pode estar apoiados sobre rodantes para trabalhar sobre o solo, podem ser totalmente passivos (plainas, aleiramento, aração, gradagem), podem ser ativos (destocadores). Podem ter configuração fixa (aleiramento) ou móvel (arados reversíveis). As tarefas de preparação de solo e manejo de plantas são muito variadas e depende muito da planta sendo cuidada. Cada fornecedor faz o seu projeto para uma determinada tarefa e tipo de solo. O peso médio calculado a partir do catálogo de um fornecedor, fica ao redor de 4.505kg (SANTA IZABEL IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS, 2010).

Veículos aqui se referem exclusivamente a veículos de carga, isolados ou em combinações de diferentes elementos atrelados entre si.

Os diferentes elementos podem ser caminhão simples ou trucado, cavalo mecânico 4x2, cavalo mecânico 6x4, semi-reboques 6x0, reboques 6x0, reboques 8x0. O elemento de ligação entre os elementos podem ser tipo A1 (engate rígido com cambão) ou tipo A2 (quinta roda).

Estas definições são parte das normas DNIT e Denatran para veículos rodoviários de carga em território brasileiro. As normas completas podem ser encontrados nos sites do DNIT e TRC. Tabela 7-2 lista os veículos de carga mais comuns usados na indústria sucroenergética.

**Tabela 7-2 Veículos da Legislação Denatran e Normas DNIT**

Veículo	Tração <sup>1</sup>	Reboque 1	Reboque 2	Reboque 3	PBT <sup>2</sup> ton	Tara <sup>3</sup> ton
Toco	1 duplo				16	8
Trucado	2 duplo				23	9
Triexio	3 duplo				31,5	10
Cavalo + carreta	1 duplo	3 duplo			41,5	12
Cavalo trucado + carreta	2 duplo	3 duplo			45	13
RJ1	2 duplo	1 duplo + 2 duplo			45	13
RJ2	2 duplo	2 duplo + 2 duplo			57	14
Bi Trem	2 duplo	2 duplo	2 duplo		57	21
Rodotrem	2 duplo	2 duplo	2 duplo + 2 duplo		74	26
Treminhão 9 eixos	2 duplo	3 duplo	3 duplo		74	26
Tri trem 9 eixos	2 duplo	2 duplo	2 duplo	2 duplo	74	26

**Fonte** Elaboração do autor com base na Legislação DNIT e Denatran e Tabela de fretes CRTA

<sup>1</sup> Número de eixos com tração motriz. Quanto mais eixos motrizes, maior a capacidade de tração

<sup>2</sup> PBT é o Peso Bruto Total, peso em toneladas do veículo completo, abastecido, carregado

<sup>3</sup> Tara é o Peso do veículo em ordem de marcha e com implementos como carroceria, plataformas



**Tabela 7-3 Atributos e características de veículos de carga**

Parametro	Atributo	ValMax	ValUso	ValMin
Bi Trem	Consumo km/litro		1,60	
Bi Trem	num pneus		26,00	
Bi Trem	Payload ton		36,00	
Bi Trem	Pbt ton		57,00	
Bi Trem	Tara ton		21,00	
Cavalo + carreta	Consumo km/litro	1,80	1,80	1,80
Cavalo + carreta	num pneus		18,00	
Cavalo + carreta	Payload ton		29,50	
Cavalo + carreta	Pbt ton		41,50	
Cavalo + carreta	Tara ton		12,00	
Cavalo trucado + carreta	Consumo km/litro	1,60	1,60	1,60
Cavalo trucado + carreta	num pneus		22,00	
Cavalo trucado + carreta	Payload ton		31,00	
Cavalo trucado + carreta	Pbt ton		45,00	
Cavalo trucado + carreta	Tara ton		14,00	
RJ1 Romeu Julieta 1	Consumo km/litro	2,14	1,87	1,60
RJ1 Romeu Julieta 1	num pneus		22,00	
RJ1 Romeu Julieta 1	Payload ton	28,00	27,00	28,00
RJ1 Romeu Julieta 1	Pbt ton		45,00	
RJ1 Romeu Julieta 1	Tara ton		18,00	
RJ2 Romeu Julieta 2	Consumo km/litro	2,14	1,87	1,60
RJ2 Romeu Julieta 2	num pneus		26,00	

RJ2 Romeu Julieta 2	Payload ton	36,00	36,00	28,00
RJ2 Romeu Julieta 2	Pbt ton		57,00	
RJ2 Romeu Julieta 2	Tara ton		21,00	
Rodotrem	Consumo km/litro		1,10	
Rodotrem	num pneus		34,00	
Rodotrem	Payload ton	65,00	48,00	
Rodotrem	Pbt ton		74,00	
Rodotrem	Tara ton		26,00	
Toco	Consumo km/litro	4,00	4,00	4,00
Toco	num pneus		6,00	
Toco	Payload ton		8,00	
Toco	Pbt ton		16,00	
Toco	Tara ton		8,00	
Treminhão 9 eixos	Consumo km/litro		1,20	
Treminhão 9 eixos	num pneus		34,00	
Treminhão 9 eixos	Payload ton	48,00	48,00	45,00
Treminhão 9 eixos	Pbt ton		74,00	
Treminhão 9 eixos	Tara ton		26,00	
Triexio	Consumo km/litro	2,00	2,00	2,00
Triexio	num pneus		14,00	
Triexio	Payload ton		20,50	
Triexio	Pbt ton		31,50	
Triexio	Tara ton		11,00	
Trucado	Consumo km/litro	3,00	2,20	2,20
Trucado	num pneus		10,00	
Trucado	Payload ton		14,00	
Trucado	Pbt ton		23,00	
Trucado	Tara ton		9,00	

Fonte Legislação Denatran e Normas DNIT

## 7.4 A4 - Equipamentos Industriais e Edifícios

Como uma usina de E1G brasileira é autosuficiente em termos de energia operacional, muita pouca informação sobre equipamentos industriais, operação e manutenção é disponibilizada nos estudos acadêmicos direcionados a LCA ou balanço energético. Os estudos encontrados relatam dados relativamente confiáveis sobre insumos industriais como ácido sulfúrico, floculantes, calcáreo, lubrificantes e outros insumos industriais necessários para tratamento do caldo antes da fermentação e para operação da usina.

Não foram encontrados relatos sobre consumo de combustível fóssil dentro da usina, que certamente tem uma frota de veículos de apoio, desde veículos leves para uso das pessoas, até caminhões para movimentação interna de insumos e matéria prima, além de veículos médios para manutenção dos equipamentos. Sem dados confiáveis, esta parcela de energia necessária foi deliberadamente deixado fora do balanço, entrando na parcela que vai superestimar ligeiramente EROI final.

Mesmo dados básicos como peso de equipamentos como caldeiras, geradores, torres de destilação, tanques de armazenamento, são difíceis de encontrar. Catálogos de fornecedores como Dedini informam brevemente algumas características de desempenho garantido, mas nunca dados dimensionais nem massa de material. Os prospectos enfatizam soluções “turn key” (soluções prontas tipo “porteira fechada”). Sem especificações dimensionais e de materiais, e sem peso de equipamentos, fica difícil até de estimar a energia de materiais e produção. A melhor informação levantada é que a energia de metais como geradores é muito mais alta que a energia de aços normais, mesmo aço estrutural. Em geradores de energia elétrica, as turbinas são feitas com materiais forjados com ligas específicas para altas temperaturas e altas demandas mecânicas por causa da alta rotação das turbinas e caixas de redução.

Uma referência, muito citada pela maioria dos estudos acadêmicos, (MACEDO, 2004) tem alguns dados sobre a infraestrutura industrial de uma usina. Os dados não são normalizados em termos de tipos de informação e EFP. A lista está resumida na Tabela 7-4. Cada equipamento será detalhado nos subitens a seguir.

**Tabela 7-4 Lista Equipamentos básicos de Usina de Etanol**

Equipamento	m <sup>2</sup> <sup>1</sup>	M <sup>2</sup>	ton <sup>3</sup>	vida <sup>4</sup>	manut <sup>5</sup>	EFPP <sup>6</sup>	EnergiaTot <sup>7</sup>
predios industriais	5.000			50	0.04	11.304	56.521.800
escritorios	300			50	0.04	18.841	5.652.180
oficinas	1.000			50	0.04	7.118	7.117.560
laboratorio	500			50	0.04	7.118	3.558.780
tancagem	4.000			25	0.04	2.093	8.373.600
esteira cana		30	45	10	0.04	69.780	3.140.100
esteira bagaço		200	180	10	0.04	90.714	16.328.520
mesa lavagem			42	10	0.04	69.780	2.930.760
moendas			220	25	0.04	117.230	25.790.688
turbinas geradores			50	25	0.04	75.362	3.768.120
caldeiras			310	25	0.04	58.615	18.170.712
destilaria aço carb			76	25	0.04	91.999	6.991.956
destilaria aço inox			400	25	0.04	252.883	101.153.088

**Fonte: MACEDO (2004)**

Todos os equipamentos foram dimensionados pelo autor MACEDO (2004) para uma produção diária de 120.000 litros de E1G, com uma produtividade de 88,7 litros por tonelada de cana, trabalhando 180 dias por ano/safra. Com estes dados, chegamos a 243.517 toneladas de cana por ano. Esta moagem determina a especificação das moendas e dos sistemas de limpeza da cana crua. Com a produtividade atual de 76,3 litros/ton (CONAB, 2016) a moagem teria que ser aumentada para 283.000 ton/ano. No entanto, MACEDO (2004) estima que a capacidade instalada real é 50% maior, isto é, a instalação descrita pode produzir 180.000 litros/dia de E1G, com a correspondente moagem. Como a limitação do sistema é a moagem, que usa o máximo de energia, esta dissertação assume que a usina modelo descrita por MACEDO (2004) tem capacidade produtiva de 180.000 litros/dia com capacidade de moagem de 365.276 ton cana por safra, produzindo 154.887 litros/dia de E1G.

<sup>1</sup> Área ocupada em metros quadrados, a intensidade de energia é dada em MJ/m quadrado

<sup>2</sup> Comprimento do equipamento em metros, a intensidade de energia é dada em MJ/m linear

<sup>3</sup> Peso do equipamento em toneladas, a intensidade de energia é dada em MJ/tonelada

<sup>4</sup> Vida útil em anos, alguns equipamentos foram estimados pelo autor, já que não foram especificados se é equipamento leve, médio ou pesado na classificação de MACEDO (2004)

<sup>5</sup> Taxa de manutenção, em fração do equipamento por ano. Exemplo: 0,04 implica que a cada ano 4% da energia total do equipamento é usado em peças, serviços e complementos para manutenção do equipamento. Estimativa de MACEDO (2004)

<sup>6</sup> EFP Energy Foot Print ou intensidade de energia, dado em MJ/unidade onde unidade pode ser área ocupada, comprimento, peso.

<sup>7</sup> Energia total associado ao equipamento industrial, dado em MJ. Não contém energia de transporte nem de instalação (terraplanagem, infraestrutura de utilidades como água, vapor, elétrica, gases, refrigeração), nem energia de recursos humanos tanto de instalação como de operação

### **7.4.1 Predios Industriais**

Os prédios industriais são as construções que abrigam os equipamentos para recebimento, limpeza, extração do caldo, pré tratamento do caldo e fermentação. As torres de destilação não estão inclusas, nem o sistema de cogeração.

MACEDO (2004) especifica que todos os prédios industriais ocupam uma área de 5.000 metros quadrados, com uma intensidade de energia de  $11.304\text{MJ/m}^2$ , com uma vida útil de 50 anos e uma taxa de manutenção anual de 4%. Destes dados resulta uma energia anual devido aos prédios de  $1.130.436\text{MJ/ano}$  e uma energia anual devido à manutenção dos prédios de  $2.260.872\text{MJ/ano}$ , em um total de  $3.391.308\text{MJ/ano}$ . Com o processamento de 365.276 ton cana por ano, temos finalmente que alocar  $9,28\text{MJ/ton}$  cana processada só devido à energia dos prédios industriais.

### **7.4.2 Escritorios**

MACEDO (2004) aloca  $300\text{m}^2$  para escritórios, porém com EFP de  $18.841\text{MJ/m}^2$ , com vida útil de 50 anos e taxa de manutenção de 4% anual. Usando a mesma metodologia de cálculo de Edifícios Industriais, chega-se ao valor de  $0,93\text{MJ/ton}$  de cana processada, devido à energia da edificação de escritórios.

Note que não há dados de custos operacionais para equipamentos de escritório, como mobiliário, impressoras, computadores, ar condicionado, etc. Este custo operacional energético está alocado na energia elétrica geral para a usina inteira ( $12,9\text{kWh}$  por ton cana, equivalente a  $46,44\text{MJ/ton}$  cana), mas a energia indireta associada a estes produtos de alta tecnologia não está sendo contabilizado.

Outra observação pertinente é descobrir o motivo de EFP de escritórios ser bem maior que a EFP de prédios industriais ( $18.841\text{MJ/m}^2$  contra  $11.304\text{MJ/m}^2$ ), e ambos terem EFP muito maior que Oficinas e Laboratórios ( $7.118\text{MJ/m}^2$ ).

### **7.4.3 Oficinas**

MACEDO (2004) aloca  $1.500\text{m}^2$  para oficinas e laboratórios. Nesta dissertação foram separados, arbitrariamente, em  $1.000\text{m}^2$  para oficinas, e  $500\text{m}^2$  para laboratórios. Esta divisão não é baseado em dados estatísticos reais. Foi dividido para que no futuro, com mais dados, possa usar dados diferentes para energia de oficina (manutenção eletro-mecânica) e portanto tem que ter uma estrutura de serviço pesado, e laboratórios, com energia de construção semelhante a escritórios, mas com equipamentos analíticos para levantamento de parâmetros físico-químicos de controle de qualidade de cana (para fins de remuneração à carga de cana que chega à usina) e do EIG produzido. Além disso, possivelmente está envolvido no controle das leveduras usadas, e sua reciclagem ou disposição como biomassa excedente.

MACEDO (2004) relata que a EFP de oficinas e laboratórios é de apenas  $7.118\text{MJ/m}^2$ , com vida útil de 50 anos. A taxa de manutenção é mantido em 4% ao ano.

Usando os mesmos critérios de Instalação Industrial e de Escritórios, resulta em 1,17MJ/ton cana processada. Como estamos no item Oficinas, é notado que não foi conseguido informação sobre os equipamentos necessários para manutenção, nem sua vida útil. Certamente tem muitas ferramentas manuais, pneumáticas e elétricas, possivelmente para serviço pesado por causa de caminhões, tratores e implementos. Muito provavelmente tem instalações para solda, desbaste e produção de pequenas peças. Sem informações confiáveis, foi deixado de fora a energia destes equipamentos.

Também não foi conseguido informações confiáveis sobre o número de pessoas que trabalha em uma usina, entre pessoal operacional e administrativo. De novo, esta energia não foi contabilizada, embora influencie pouco no resultado final.

#### **7.4.4 Laboratório**

Nesta dissertação, está alocado os restantes 500m<sup>2</sup> para Laboratórios, cuja função é controle de qualidade da cana que chega, e características físico químicas do caldo e etanol produzido.

Note que neste valor só está a energia do prédio, não tem a energia dos equipamentos de laboratório (normalmente de alta tecnologia e com vida útil de uma década ou menor), nem os reagentes químicos (produtos altamente purificados e portanto com alta intensidade de energia por kg ou por litro), nem dos equipamentos para obtenção de amostras da cana, nem dos veículos leves para movimentação de pessoas do pátio de recebimento até o laboratório ou vice versa.

Usando os critérios de construções de edifícios industriais e oficinas, a contribuição de demanda energética devido ao laboratório é de 0,58MJ/ton cana processada.

#### **7.4.5 Tancagem**

MACEDO (2004) relata que a área dedicada a tanques de armazenamento do E1G produzido ocupa 4.000 m<sup>2</sup> com vida útil de 25 anos com manutenção de 4% ao ano e EFP de 2.093MJ/m<sup>2</sup>. Não revela o volume de E1G estocado, energia por kg de aço inoxidável usado, energia de fabricação, nada.

Mesmo usando a capacidade total da usina modelo, com 180.000 litros por dia, segundo MACEDO (2004), e a produtividade de 76,3 litros/ton de cana processada (CONAB, 2016), trabalhando 180 dias por ano, temos um processamento de 424.500 toneladas de cana por ano. Assumindo que uma usina processe cana todo dia da semana, temos uma produção mensal de E1G de aproximadamente 5,4 milhões de litros. O processamento anual resultaria na produção de 32,4 milhões de litros de E1G.

A Resolução 45/2013 da ANP requer tancagem mínima de 120 dias de capacidade de produção. Notícias da Raizen de 2015 informam que entra na entressafra com reservas de 45% da produção da safra, ou seja, tem tancagem para aproximadamente meio ano de capacidade de produção. Adotando estes parâmetros, a usina modelo relatado por MACEDO (2004) tem que ter tancagem para pelo menos 32,4 milhões de litros.

Assumindo um tanque individual de 10.000.000 de litros de E1G, feito de aço inox ou pelo menos de aço estrutural protegido contra corrosão do E1G, e adotando o formato que tenha a menor superfície por volume, onde a altura do cilindro é igual ao diâmetro do cilindro, temos um raio de 11,68 m. Anúncios online na internet mostra tanques de apenas 15.000 litros de aço inox com espessuras de 4,75mm (mfrural.com.br). Outro fornecedor informa que tanques com 60.000 litros de capacidade, porém em aço carbono, tem espessura de chapa de 6,35mm (tenaris.com). Foram encontrados tanques usados com 3,5mm de aço inox, com encamisamento de 5mm como reforço, com capacidades de até 100.000 litros. Norma NBR 15461 de 2007 regula a produção de tanques para combustíveis no Brasil. Segundo a Tabela A12 desta norma, a espessura mínima de aço carbono para tanques horizontais até 190.000 litros é de 9,27 mm. Para tanques verticais, a Tabela A16 da NBR 15461 de 2007 especifica para tanques de pouco mais de 34.000 litros, espessuras de 6,1mm. Nesta dissertação, é adotado uma espessura de 10mm para a espessura de chapa de um tanque de 10.000.000 litros. Este dado deve ser refinado com o tempo, consultando especialistas em engenharia mecânica para um projeto real para um tanque de 11,68m de raio e 23,76m de altura com aço estrutural ou aço inoxidável. Com a espessura de 10mm temos pelo menos meios de calcular uma ordem de grande de energia do material.

Com as medidas já mencionadas, adotando a densidade do aço de 7,85 temos uma área da base de 428,5m<sup>2</sup> e área de costado (parede cilíndrica vertical) de 1.713m<sup>2</sup>, em um total de 25,69 toneladas de aço (só para o costado), com uma massa total para o tanque, de 201,71 toneladas. Para um volume total de armazenamento de 40.000.000 litros, suficiente para atender a Resolução 45/2013 da ANP, temos uma massa total para a usina, de 806,22 toneladas. Usando a EFP de 79,97MJ/kg de aço (praticamente a mesma energia de aço de caminhão e trator que não tem que atender tantas normas de segurança e pureza de produtos armazenados), temos um total de 16.130MJ/m<sup>2</sup> (energia total de 6,45×10<sup>07</sup> por 4.000 m<sup>2</sup>). Este valor é bem mais compatível com a EFP de prédios e outros conjuntos estruturais, e contrasta muito com o valor 2.190,74MJ/m<sup>2</sup> (bem inferior à EFP de prédios) relatado por MACEDO (2004). O referido autor não especifica como chegou a este resultado. Baseado em requerimentos recentes como a norma ANP e norma NBR, esta dissertação adota o valor calculado de 16.130MJ/m<sup>2</sup>, mais condizente com o valor de 11.304MJ/m<sup>2</sup> para prédios industriais, e com 18.841MJ/m<sup>2</sup> para prédios de escritórios. Usando os novos dados, resulta em uma demanda de 14,13MJ/ton cana processada.

#### **7.4.6 Esteira Cana**

MACEDO (2004) declara uma esteira para transporte de cana com comprimento de 30 metros, 45 toneladas, 10 anos de vida útil, 4% de taxa de manutenção, com EFP de 69,78MJ/kg de esteira. Estes dados resulta em uma massa de 1,5 toneladas por metro linear de esteira, contribuindo com 439.614MJ/ano para a energia indireta, resultando finalmente em 1,20MJ/ton de cana processada.

#### **7.4.7 Esteira Bagaço**

MACEDO (2004) declara uma esteira para transporte do bagaço para local de armazenamento e cogeração, com 200m de comprimento, pesando 180 toneladas, vida útil de 10 anos, 4% de taxa de manutenção, com EFP de 90,714MJ/kg de material. Dos dados se calcula que cada metro linear desta esteira tem massa de 900kg, bem menor que a esteira de cana. No entanto, a sua EFP é bem maior que a EFP da esteira de cana. MACEDO (2004) não declara a causa. Possivelmente devido ao número de motores para movimentar uma esteira tão longa e com grande quantidade de massa movendo ao mesmo tempo. Contribui com 2.285.993MJ/ano resultando em 6,26MJ/ton cana processada.

#### **7.4.8 Mesa Lavagem**

MACEDO (2004) mostra que a usina típica tem uma mesa de lavagem de cana recebida, com massa de 42 toneladas, 10 anos de vida útil, 4% de manutenção, com EFP de 69,78MJ/kg de material. Destes números resulta 410.306MJ/ano com resultado final em 1,12MJ/ton cana processada.

#### **7.4.9 Moendas**

MACEDO (2004) menciona o uso de 5 moendas com massa total de 220 toneladas, vida útil de 25 anos, taxa de manutenção de 4%, intensidade de energia de 117,230MJ/kg de material. Este EFP é condizente com o uso de aço forjado para os cilindros. Estes números resulta em uma demanda de 5,65MJ/ton cana processada

#### **7.4.10 Turbinas Geradores**

MACEDO (2004) alocou para turbinas, geradores e caixas redutoras um total de 50 toneladas, com vida útil de 25 anos, 4% de taxa de manutenção, e EFP de 75,362MJ/kg. Nenhuma outra especificação ou característica detalhada, não permitindo verificação de dados. A parte de controle eletrônico tem intensidade de energia bem maior, e geralmente as turbinas movidos a vapor superaquecido tem intensidade de energia maior que a EFP de motores de caminhão e trator. Também não está discriminado a infraestrutura de distribuição interna, transformadores, painel de controle e outros equipamentos de infraestrutura. Usando os dados relatados, chega-se a 0,83MJ/ton cana processada.



#### **7.4.11 Caldeiras**

MACEDO (2004) informa que Caldeiras tem massa de 310 toneladas, vida útil de 25 anos, taxa de manutenção de 4%, EFP de 58,615MJ/kg, resultando em 3,98MJ/ton cana processada.

#### **7.4.12 Destilaria Aço Carbono**

MACEDO (2004) mostra que a parte da destilaria que usa aço carbono tem 76 toneladas de massa, com vida útil de 25 anos, manutenção de 4%, e EFP de 91,999MJ/kg de material. Este valor de EFP é um pouco mais alto que aço estrutural, portanto deve ser um aço especial altamente resistente a corrosão do etanol e outros compostos derivados, além de temperaturas de destilação e umidade, principalmente nos platos de destilação. Os dados relatados resulta em 1,53MJ/ton cana processada. É também aqui que é usada a maior parte da energia da queima do bagaço, na forma de uso de vapor de processo.

#### **7.4.13 Destilaria Aço Inox**

MACEDO (2004) declara que a parte da destilaria que usa aço inoxidável tem 400 toneladas de massa, vida útil de 25 anos, manutenção de 4%, e EFP de 69,501MJ/kg. Este valor de intensidade de energia está muito baixo, o mesmo autor (MACEDO, 2004) reporta no mesmo estudo que a EFP de aço inoxidável tem intensidade de energia variando de 67,826MJ/kg até 92,110MJ/kg, com uma média de 79,968MJ/kg. Valor adotado: 79,968MJ/kg, resultando em uma demanda de energia de 7,01MJ/ton cana processada.

## 7.5 A5 - Parâmetros e Constantes

Para permitir modularidade, simulações e minimizações de erros de digitação, foram montados dois grupos de variáveis: Constantes e Parâmetros.

Constantes são dados que normalmente permitem conversões de uma unidade para outra, ou constantes físico-químicas. São dados tabelados em compêndios de física ou química. Por exemplo, temos TSI solar, conversão de caloria para Joule, energia de queima de diesel, gasolina e etanol.

Parâmetros são dados que normalmente dependem da literatura revisada, dependem da tecnologia, de condições operacionais, do equipamento. Os parâmetros foram divididos em primários e secundários, como os dados. Os parâmetros primários podem ser consumo de combustível de tratores e veículos, vida útil de equipamentos, eficiência de processos industriais, energia indireta de materiais e equipamentos. Os parâmetros secundários são valores que são usados em várias equações, e são guardados não só para facilitar os cálculos e poupar tempo, como para eliminar erros de digitação e transcrição. Sempre que possível, os parâmetros foram registrados com valor máximo, mínimo e adotado. Os parâmetros já foram descritos no apêndice A1 e A2.

As constantes são listados na Tabela 7-5

**Tabela 7-5 Constantes físicas e químicas usadas**

De (unidade)	De (produto)	Para (unidade)	Para (valor)
Litro	Diesel	MJ	35,45318
Litro	Etanol Anidro	MJ	22,30633
Litro	Etanol Hid	MJ	20,96795
Litro	Gasolina	MJ	31,55671
Litro	Diesel	MTEP	$8,467848 \times 10^{-10}$
Litro	Etanol Anidro	MTEP	$5,327775 \times 10^{-10}$
Litro	Etanol Hid	MTEP	$5,008109 \times 10^{-10}$
Litro	Gasolina	MTEP	$7,537191 \times 10^{-10}$
Unidade	HP	Watt	735,4875
Unidade	Watt	HP	$1,359642 \times 10^{-03}$
Unidade	HPh	kWh	0,7354875
Unidade	HPh	MJ	2,647755
Unidade	kWh	MJ	3,600000
Unidade	MJ	kWh	0,2777778
Unidade	cal	Joule	4,186800
Unidade	Joule	Cal	0,2388459
Unidade	barril	Litro	158,9873
Unidade	litro	Barril petróleo	$6,289811 \times 10^{-03}$
Unidade	TEP	BTU	$3,968321 \times 10^{+07}$
Unidade	TEP	Joule	$4,186800 \times 10^{+10}$
Unidade	TEP	BEP	6,841932

Unidade	TEP	MWh	11,63000
Unidade	TEP	Litro Petróleo	1.087,780
Unidade	BTU	TEP	$2.519958 \times 10^{-08}$
Unidade	BTU	Joule	1.055,056
Unidade	BTU	BEP	$1.724138 \times 10^{-07}$
Unidade	BTU	MWh	$3.412142 \times 10^{+06}$
Unidade	Joule	TEP	$2.388459 \times 10^{-11}$
Unidade	Joule	BTU	$9.478171 \times 10^{-04}$
Unidade	Joule	BEP	$1.634167 \times 10^{-10}$
Unidade	Joule	MWh	$2.777778 \times 10^{-10}$
Unidade	BEP	TEP	0,1461575
Unidade	BEP	BTU	$5.800000 \times 10^{+06}$
Unidade	BEP	Joule	$6.119324 \times 10^{+09}$
Unidade	BEP	MWh	1.699812
Unidade	MWh	TEP	$8.598452 \times 10^{-05}$
Unidade	MWh	BTU	$3.412142 \times 10^{+06}$
Unidade	MWh	Joule	$3.600000 \times 10^{+09}$
Unidade	MWh	BEP	0,5883003
Unidade	Galão	Litro	3,785412
Unidade	Litro	Galão	0,2641721
Unidade	Litro	TEP	$9,193032 \times 10^{-04}$
Unidade	MPG	km/L	0,4251437
Unidade	km/L	MPG	2,352146
Unidade	knots <sup>1</sup>	Km	1,851852
Unidade	Scf <sup>2</sup> nat gas	MJ	1,084597
Unidade	Nm <sup>3</sup> <sup>3</sup> nat gas	MJ	38,30220
Unidade	kg GLP	MJ	45,75000
Unidade	MJ	kg GLP	$2,185792 \times 10^{-02}$

**Fonte: Elaboração do autor**

<sup>1</sup> NÓ, velocidade quando se move a uma milha marítima por hora. Uma milha marítima é uma unidade usada para navegação, equivale à distância de um minuto de arco da circunferência média da Terra

<sup>2</sup> Scf é Standard Cubic Feet uma unidade para gás natural gasoso, equivalente a um pé cúbico de gás natural a 60°F (15,6°C) e a 14,73 PSIA (Q ATM OU 101.325Pa)

<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup> é Normal cubic meter uma unidade de gás natural gasoso, equivalente a um metro cúbico de gás natural a 15,0°C sob uma pressão de 101.325Pa (1 atm)