

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ELISANGELA FERNANDES DA SILVA CAMPANA POSSIDÔNIO

**ANÁLISE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE BIOMASSA COM RESÍDUOS
DENSIFICADOS**

Sorocaba
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ELISANGELA FERNANDES DA SILVA CAMPANA POSSIDÔNIO

**ANÁLISE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE BIOMASSA COM RESÍDUOS
DENSIFICADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Co-orientação: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso.

Sorocaba
2015

P856a Possidônio, Elisangela Fernandes da Silva Campana.
Análise de redes de abastecimento de biomassa com resíduos
densificados. / Elisangela Fernandes da Silva Campana Possidônio .
-- 2015.
112 f. : 28 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos,
Campus Sorocaba, Sorocaba, 2015

Orientador: João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
Banca examinadora: Fábio Minoru Yamaji, Luiz Carlos Estraviz
Rodriguez
Bibliografia

1. Logística empresarial. 2. Biomassa - energia. 3. Modelos
matemáticos. I. Título. II. Sorocaba-Universidade Federal de São
Carlos.

CDD 658.5


Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do *Campus* de Sorocaba.

ELISANGELA FERNANDES DA SILVA CAMPANA POSSIDÔNIO

**"ANÁLISE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE BIOMASSA
COM RESÍDUOS DENSIFICADOS"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade da Universidade Federal de
São Carlos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Área de
Concentração: Gestão de Operações.
Sorocaba, 6 de março de 2015

Orientador (a):



Prof. (a). Dr. (a). João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
UFSCar/DEPS

Examinadores (as):



Prof. (a). Dr. (a). Luiz Carlos Estraviz Rodriguez
USP/ESALQ



Prof. (a). Dr. (a). Fábio Minoru Yamaji
UFSCar/DCA

DEDICATÓRIA

*Ao melhor de mim,
Luana, Lucas e Gabriel.*

Epígrafe

*“Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão, perder com classe e
vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem
se atreve... A vida é muita para ser insignificante.”*

Charles Chaplin.

AGRADECIMENTO

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus por ter me permitido chegar aonde cheguei, por toda força e coragem, durante toda esta longa caminhada.

Agradeço também ao meu pai e minha mãe (in memoriam) por terem me gerado.

Agradeço ao meu esposo por toda compreensão e apoio nos momentos de dificuldade, quero agradecer também aos meus filhos, Luana, Lucas e Gabriel, que embora não tenham nenhum conhecimento disto, iluminaram de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos.

Ao meu orientador, não tenho nem palavras para expressar o quanto sou grata por toda paciência, dedicação, disposição para me ouvir e me ensinar, e que em inúmeros momentos soube me estimular a alcançar esta essencial conquista e me ajudou desenvolver uma nova visão.

À minha co-orientadora, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível este trabalho.

Ao professor Fábio Yamaji que me incentivou a iniciar este trabalho e sempre foi meu socorro em momentos de dúvidas.

Também ao professor Luiz Carlos Estraviz Rodriguez, pela sua orientação e revisão cuidadosa.

A todos os professores do PPGEPS.

À Erica, secretária do programa, por toda dedicação ao seu trabalho.

À UFSCAR, em especial aos professores do DCA por terem me liberado para participar deste programa de mestrado.

A todas as pessoas que contribuíram com dados para este trabalho, o Denisson, o Marcelo, a Ana, o Junior, a Tânia Carla e em especial ao Nilton e a Elizabete que são pessoas iluminadas.

A todos meus amigos e familiares que de uma maneira ou de outra contribuíram com meu trabalho, em especial à Sônia que sem conhecimento nenhum do meu trabalho por vezes me auxiliou.

Acredito ser impossível citar o nome de todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para este trabalho, os que não citei o nome, deixo aqui meu agradecimento e peço desculpas.

RESUMO

POSSIDÔNIO, E.F.S.C. *Análise de redes de abastecimento de biomassa com resíduos densificados*. 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2015.

A biomassa tem adquirido importância crescente como fonte de energia alternativa. A possibilidade de diversificação da matriz energética, com redução da dependência dos combustíveis fósseis, tem ampliado sua aceitação no mercado. Apesar de ser uma fonte barata e renovável e o Brasil ser um grande produtor de biomassa agrícola e florestal, o aproveitamento desses resíduos encontra barreiras, devido à baixa densidade e baixo rendimento energético, que podem elevar o custo para sua utilização. Como opção, a densificação da biomassa tem chamado a atenção devido à superioridade sobre a biomassa *in natura*, em relação às características físicas e ao poder calorífico. Este trabalho visa estudar como ocorre a distribuição de biomassa a partir dos locais de disponibilização do produto até os pontos de consumo, além de avaliar o impacto da densificação da biomassa nas operações de distribuição e nos custos de transporte. De forma complementar, elaborou-se um estudo comparativo entre o abastecimento com combustível renovável e não-renovável, mais especificamente, com gás natural. Para a caracterização das redes de abastecimento e coleta de dados foram realizadas visitas a empresas do ramo, e para a comparação dos custos nas operações de distribuição, utilizou-se um modelo de transporte. Os resultados do estudo comparativo dos cenários apresentaram a possibilidade de redução de 51% a 60% nos custos de transporte e uma redução de 63% na quantidade de veículos utilizados para o abastecimento da rede. No entanto, o custo do material densificado elevou os custos totais em 41,6% em relação aos resíduos *in natura*. No estudo comparativo do abastecimento com combustível renovável e não-renovável os materiais considerados no trabalho apresentaram vantagens econômicas em relação ao gás natural.

Palavras-chave: Rede de abastecimento. Modelagem matemática. Transporte. Densificação.

ABSTRACT

Biomass has acquired increasing importance as an alternative energy source. The fact of it being considered one of the main alternatives for diversification of energy sources and reducing dependence on fossil fuels, has increased its market acceptance. Despite of being a cheap and renewable source and Brazil being a large production of agricultural and forestry biomass, the use of such waste find some barriers; because of low density and low energy efficiency, which can increase the cost to use. The densification of biomass has drawn attention due to the superiority of the biomass in nature, in relation to the physical characteristics and the characteristic combustion. This work aims in a general way, studies how occurs the distribution of biomass from the product available local to the points of consumption, more specifically to assess the impact of biomass densification in the distribution operations and on transport costs. As a complement, a goal is to make a comparative study of supply with renewable fuel and non-renewable, more specifically with natural gas. For the characterization of supply networks and data collection were carried out visits to companies in this kind of industry, and to compare the costs in distribution operations, it was used a transport model. The results of the comparative study of the scenarios presented the possibility of reduction of 51-60% in transport costs and a 63% reduction in the number of vehicles used for the supply network. However, the cost of densified materials increased total cost in 41.6% in relation to waste in nature. In the comparative study of supply with renewable and nonrenewable fuel materials considered in the study showed economic advantages over natural gas.

Keywords: Supply network. Mathematical modeling. Transportation. Densification.

Lista de Figuras

Figura 1 – Divisão da Oferta Interna de Energia em 2013.....	22
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira do ano de 2013.	22
Figura 3 - Distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil em 2012.	28
Figura 4 - Energia transportada pelo caminhão em relação ao teor de umidade.....	36
Figura 5 - Combustível por caminhão.	37
Figura 6 - Efeito geral da densidade sobre os custos logísticos.	44
Figura 7 - Custo de transporte a uma distância de 100km por diferentes tipos de veículos. ...	45
Figura 8 - Distância máxima percorrida pelos diferentes tipos de veículos.....	46
Figura 9 - Resumo da metodologia.	56
Figura 10 - Esquema do problema da rede de abastecimento de biomassa.....	61

Lista de Tabelas

Tabela 1- Participação de cada fonte termelétrica em 2013.	23
Tabela 2 - Custo de aquisição, densidade e poder calorífico de cada resíduo.	64
Tabela 3 - Distância em km entre clientes e fornecedores.	65
Tabela 4 - Capacidade mensal (k_f) de resíduos dos fornecedores em toneladas.	65
Tabela 5 - Demanda de cada cliente em toneladas.	66
Tabela 6 - Tipos de veículos e respectivas capacidades.	66
Tabela 7 - Quantidade de veículos (n_{jf}) disponível em cada fornecedor.	67
Tabela 8 - Relação de atendimento entre fornecedor x cliente (ra_{fc}).	67
Tabela 9 - Custos fixos e variáveis para cada tipo de veículo.	68
Tabela 10 - Tempo de ciclo de cada viagem entre cliente e fornecedor.	69
Tabela 11 - Custos de transporte ($frete_{jc}$).	70
Tabela 12 - Quantidade transportada em cada tipo de veículo (q_{jf}).	71
Tabela 13 - Demanda do cliente em poder calorífico (d_c).	72
Tabela 14 - Veículo para transporte de briquetes.	73
Tabela 15 - Custo de transporte para cenário 2 ($frete_{jc}$).	74
Tabela 16 - Quantidade transportada em cada tipo de veículo no cenário 2 (q_{jf}).	75
Tabela 17 - Quantidade de resíduo utilizada de cada fornecedor no cenário 1.	77
Tabela 18 - Quantidade de resíduos fornecida para cada cliente no cenário 1.	77
Tabela 19 - Custos para atendimento da rede no cenário 1.	78
Tabela 20 - Quantidade de viagens realizadas para atendimento da rede no cenário 1.	79
Tabela 21 - Quantidade de veículos disponíveis e utilizados no abastecimento da rede no cenário 1.	80
Tabela 22 - Quantidade de resíduo utilizada para abastecimento da rede no cenário 2.	82
Tabela 23 - Quantidade de resíduos fornecida para cada cliente no cenário 2.	82
Tabela 24 - Custos para atendimento da rede no cenário 2.	83
Tabela 25 - Quantidade de viagens realizadas para atendimento da rede no cenário 2.	83
Tabela 26 - Quantidade de veículos utilizados no abastecimento da rede no cenário 2.	84
Tabela 27 - Resumo dos resultados dos cenários 1 e 2.	86
Tabela 28 - Comparativo entre combustível renovável e gás natural.	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	26
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 BIOMASSA E ENERGIA	27
2.1.1 Caracterização da Biomassa	32
2.1.1.1 Categoria Florestal.....	32
2.1.1.2 Categoria Agrícola.....	33
2.1.2 Aspectos técnicos da biomassa	34
2.1.2.1 Densidade, teor de umidade e poder calorífico	35
2.1.3 Densificação de resíduos	38
2.1.3.1 Briquetagem	38
2.2 OPERAÇÕES LOGÍSTICAS COM BIOMASSA	41
2.2.1 Transporte de biomassa	43
2.3 MÉTODOS QUANTITATIVOS APLICADOS À LOGÍSTICA COM BIOMASSA.....	47
3 METODOLOGIA	53
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	53
3.2 PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	54
3.2.1 Visitas técnicas	56
3.3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE TRANSPORTE DE BIOMASSA	60
3.3.1 Dados de entrada para modelo matemático	64
3.4 APLICAÇÕES COM O MODELO MATEMÁTICO	68
3.4.1 Cenário 1 - Resíduos in natura	69
3.4.2 Cenário 2 - Resíduos densificados	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1 CENÁRIO 1 COM RESÍDUOS IN NATURA	76
4.2 CENÁRIO 2 COM RESÍDUOS DENSIFICADOS.....	81
4.3 ESTUDO COMPARATIVO DOS CENÁRIOS	85
4.4 ESTUDO COMPARATIVO COM COMBUSTÍVEL NÃO RENOVÁVEL.....	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE A	108

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia intensificou o desenvolvimento de pesquisas focadas em novas fontes para sua obtenção. Fatores como o aumento de preços dos combustíveis fósseis, o desenvolvimento dos mercados internacionais de CO₂ e o melhor conhecimento dos sistemas de bioenergia incentivaram o uso de biomassa em políticas de diversificação. Por esses motivos, o grau de competitividade da biomassa enquanto insumo tem aumentado nos últimos anos frente a outras fontes energéticas (CABRITA, 2010).

O Brasil tem um dos custos mais altos de energia do mundo, cuja tarifa média para a indústria é de R\$ 329 por MWh, quase 50% a mais que a média em 27 países do mundo que possuem dados disponíveis na Agência Internacional de Energia e com diferença que chega a 134% quando se compara o Brasil com os demais países dos BRICS (Rússia, Índia e China) (BIOMASSA..., 2014, p.36).

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria o custo do óleo combustível também subiu 12,5% no primeiro trimestre de 2014, com isso as fontes alternativas ganham mais importância, não só pela questão ambiental, mas também pela competitividade (BIOMASSA..., 2014, p.37).

As pressões da legislação ambiental também são cada vez mais intensas e estimulam empresas e governos a buscarem formas alternativas de geração de energia, que possam equilibrar a matriz energética sem comprometer o meio ambiente.

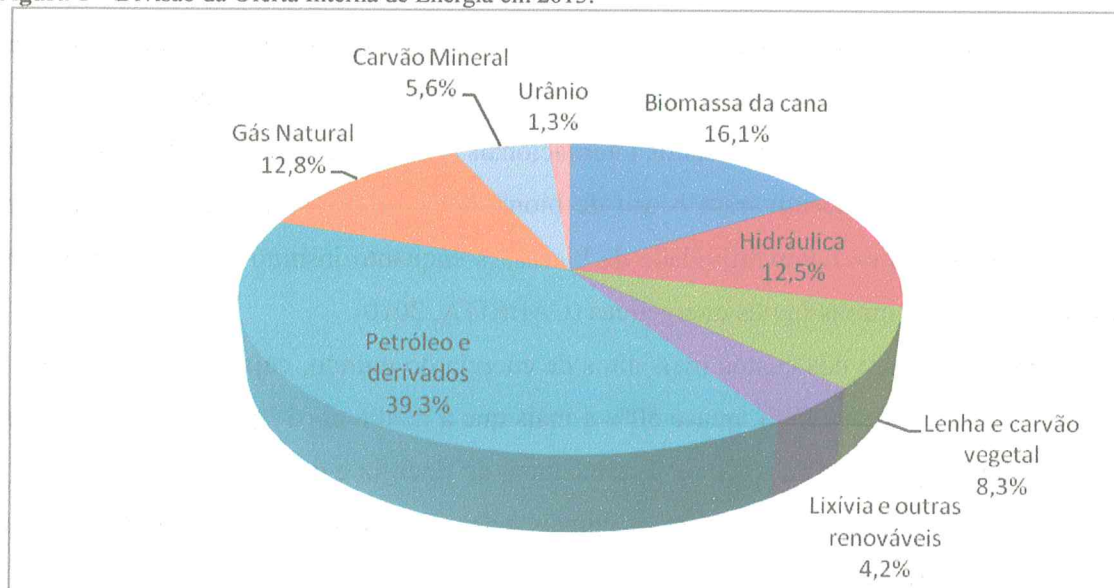
Esses motivos levaram a sociedade a fazer novas escolhas quanto ao tipo de fonte geradora para a sua obtenção. As opções disponíveis nem sempre apresentam vantagens em todos os quesitos. A energia gerada por usinas hidroelétricas, por exemplo, tem o benefício de não gerar poluentes, mas é associada a um prejuízo ambiental significativo, haja vista que grandes áreas são necessárias para a formação das barragens.

O fato de a biomassa ser uma fonte renovável de combustível, com menor emissão de gases de efeito estufa em comparação aos combustíveis fósseis, tem ampliado sua aceitação no mercado como material alternativo.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2014, no ano de 2013 a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira foi de 41% enquanto a média mundial estava em torno de 13% (BRASIL, 2014). Na Figura 1, é possível visualizar as

fontes que compõem a oferta interna de energia no ano de 2013.

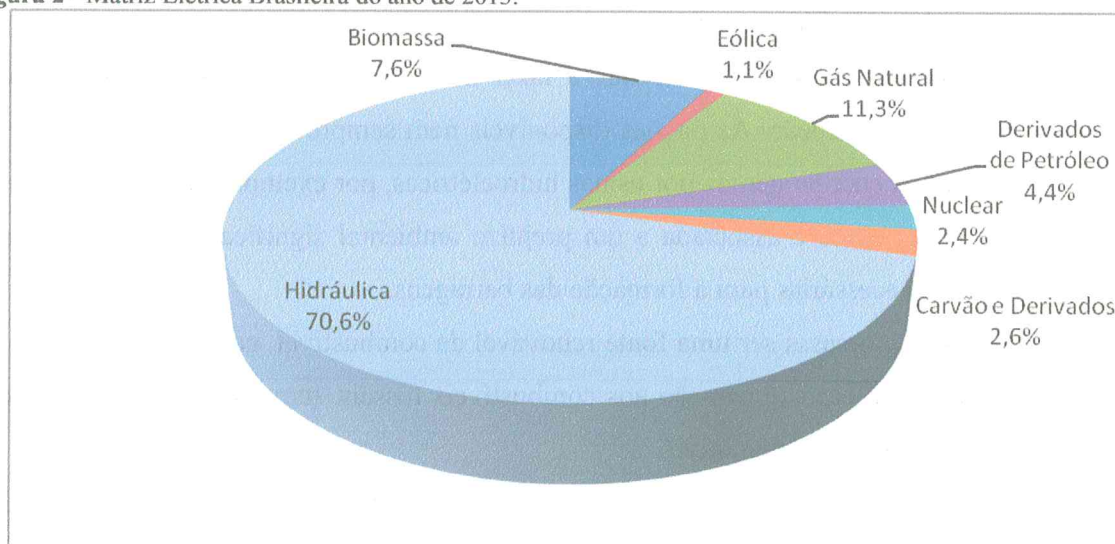
Figura 1 – Divisão da Oferta Interna de Energia em 2013.



Fonte: Brasil, 2014.

Considerando apenas a geração de energia elétrica, é possível visualizar na Figura 2, que no Brasil a oferta é predominantemente renovável, com 79,3% sendo gerada através de fontes renováveis.

Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira do ano de 2013.



Fonte: Brasil, 2014.

Pode ser visualizado também, na Figura 2, que a biomassa representa 7,6% deste total e apresentou um crescimento de 11% em relação ao ano de 2012 (BRASIL, 2014).

Na geração de energia termelétrica a utilização de biomassa é ainda maior que na geração de energia elétrica, um percentual de 26,9 (Tabela 1).

Tabela 1- Participação de cada fonte termelétrica em 2013.

Fonte	Percentual de Utilização
Biomassa	26,9%
Gás Natural	40,0%
Derivados de Petróleo	15,4%
Carvão e Derivados	9,2%

Fonte: Brasil, 2014.

Devido às condições geográficas favoráveis, o Brasil pode assumir uma posição de destaque no plano mundial quanto à produção e uso da biomassa como recurso energético (BRASIL, 2007), visto que há no país uma grande produção de resíduos provenientes de biomassa florestal e agrícola (PROTÁSIO et al., 2011).

Com uma área de florestas plantadas da ordem de 7,2 milhões de hectares, em franca expansão, e a evolução de equipamentos para geração de cavacos com volumes competitivos, as indústrias têm condições de obter energia mais barata e a partir de fontes renováveis (BIOMASSA..., 2014, p.36).

Os resíduos gerados na área florestal e agrícola podem ser prejudiciais ao meio ambiente em caso de manejo impróprio, podendo assorear e poluir os cursos d'água, ocupar extensos espaços nas indústrias e poluir o ar por meio de sua queima inadequada (PROTÁSIO et al., 2011) mas por outro lado pode resultar em economias se o reaproveitamento for propriamente planejado e incentivado (BRASIL, 2007).

Com a utilização, esses resíduos deixam de ser descartados e passam a ser um subproduto, podendo gerar benefícios como:

- Complementar o faturamento da empresa;
- Diminuir o risco de problemas ambientais;
- Evitar eventuais multas decorrentes do descarte incorreto.

“A utilização de fontes renováveis de geração de energia com tecnologias que contribuem para o uso eficiente e limpo tem forte tendência no cenário internacional” (SIMIONI e HOEFLICH, 2010), visto que, durante os últimos anos, um interesse crescente por produção de energia sustentável tem sido visto em todo o mundo, e a maior contribuição é esperada da biomassa (MONTEIRO, MANTHA e ROUBOA, 2012). Apesar de incertezas políticas em alguns países, a geografia das energias renováveis está se expandindo, na medida em que os preços caem e as políticas se espalham (REN21, 2012).

A biomassa considerada neste trabalho refere-se a resíduos, cuja origem pode ser florestal ou obtida a partir de restos de madeira de embalagens industriais (caixas, estrados, paletes), restos da indústria moveleira e do desdobro da madeira (cavacos, serrarias, maravalhas¹, etc.), resíduos decorrentes de poda urbana, dentre outros.

Apesar de ser uma fonte barata e renovável, um maior aproveitamento desses resíduos tem encontrado barreiras. A baixa densidade e o baixo rendimento energético resultam em um elevado custo para o seu aproveitamento (MONTEIRO, MANTHA e ROUBOA, 2012). Para que a utilização deste tipo de energia se torne rentável, é necessário que toda a cadeia de abastecimento esteja bem estruturada e otimizada.

Idealmente, os sistemas de movimentação e armazenagem de resíduos deveriam ser planejados de forma coordenada, visando, por exemplo, a maior ocupação possível da capacidade de carga dos veículos para reduzir os custos operacionais. De forma geral, considerando a natureza da biomassa, o alto custo de transporte é resultante de sua baixa densidade e elevada umidade, além de seu baixo valor agregado.

A densificação da biomassa tem chamado a atenção devido à superioridade sobre a biomassa *in natura*, em relação às características físicas e de combustão. Ela reduz o teor de umidade, aumenta o teor energético, aumenta a eficiência da combustão e produz uma maior homogeneidade (OBERNBERGER e THEK, 2004). Após esse processo, o material passa a ter uma densidade de 4 a 10 vezes maior que a biomassa recebida (KARWANDY, 2007).

Levando em consideração o interesse na utilização de resíduos para geração de energia, a complexidade logística para um amplo aproveitamento de resíduos e a possibilidade de densificação dos resíduos, algumas questões podem ser formuladas:

¹ Maravalha é um tipo de biomassa produzida a partir de madeira de descarte, é maior que a serragem, porém seu tamanho varia de acordo com os equipamentos utilizados, geralmente seu formato é espiral (FRAGMAQ, 2012).

- Como ocorre o suprimento de biomassa para as empresas que demandam esse produto?
- É possível melhorar a logística de suprimento de biomassa?
- O aumento da densidade desses resíduos, através da compactação, influencia a logística e os custos de suprimento da rede de abastecimento?
- Com o aumento da densidade dos resíduos é possível expandir geograficamente a coleta?

Observa-se que estes questionamentos emergem de situações que buscam alcançar vantagem competitiva e aumentar a eficiência do aproveitamento de resíduos.

No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um modelo de transporte para minimizar e comparar os custos logísticos do sistema de distribuição de biomassa em dois cenários, sendo o primeiro com resíduos *in natura* e o outro com resíduos densificados. O modelo proposto considerou uma rede de abastecimento de biomassa com várias empresas, com diferentes demandas, que adquirem resíduos de fornecedores que possuem capacidades produtivas variadas.

O abastecimento das empresas que demandam biomassa configura um problema em termos de gestão, pois é necessário tomar decisões baseadas em fatores como a quantidade e variedade de resíduos, custos de aquisição, tipos e custos de transporte, distâncias, densidade e poder calorífico dos materiais, dentre outros. A variedade de fatores justifica a utilização de modelagem matemática, pois esta ferramenta é capaz de lidar com tais variáveis de forma integrada.

A diferença do transporte de biomassa em relação a outros produtos, devido à densidade, exige um planejamento diferenciado, de modo a manter o custo final da transação o menor possível para que o sistema seja comercialmente viável. Com a finalidade de responder às questões de pesquisa, o trabalho compara a utilização dos resíduos *in natura* com o resíduo densificado no formato de briquetes.

Uma vez definido o problema de pesquisa, é importante pontuar os objetivos deste estudo para que a pesquisa se apresente coesa. Os objetivos, geral e específicos, são apresentados a seguir.

1.1 OBJETIVOS

Como objetivo geral este trabalho estudou como ocorre a distribuição de biomassa, dos locais de disponibilização do produto até os pontos de consumo.

De forma específica, este trabalho buscou:

- Avaliar o impacto da densificação da biomassa nas operações de distribuição e consequentemente nos custos de transporte;

- Comparar a rede de distribuição de biomassa da empresa selecionada como estudo de caso com os resultados apresentados pelos modelos de otimização com flexibilização das configurações da rede original;

- Realizar um comparativo entre os custos de abastecimento com combustível renovável e não-renovável.

Para uma melhor compreensão, a seção 1.2 apresenta a estrutura do trabalho.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, conforme segue:

O capítulo 1 apresenta a introdução, expõe o tema, o problema de pesquisa, a justificativa, o objetivo e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica dos temas: Biomassa e Energia, Operações Logísticas com Biomassa e Métodos Quantitativos aplicados à Logística com Biomassa.

O capítulo 3 explica a metodologia adotada, detalha os procedimentos utilizados na pesquisa, descreve os cenários, como se deu a coleta dos dados, o processo de modelagem, e a construção e definição da base de dados que serviram de entrada para o modelo matemático.

Os resultados que compõem o capítulo 4 são analisados e discutidos segundo os modelos utilizados, considerando primeiramente o cenário com resíduo “in natura”, em seguida, o cenário com resíduos densificados, logo após, uma análise comparativa entre os cenários e um comparativo entre combustível renovável e não-renovável.

O capítulo 5 apresenta as contribuições do trabalho e traz sugestões de novas pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta na seção 2.1 uma revisão a respeito de biomassa e energia, caracterização da biomassa e os aspectos técnicos da biomassa, bem como as alternativas de densificação; a seção 2.2 apresenta uma revisão sobre as operações logísticas e o transporte da biomassa e por fim a seção 2.3 apresenta uma revisão de estudos acerca de métodos quantitativos aplicados a problemas relacionados à logística da biomassa.

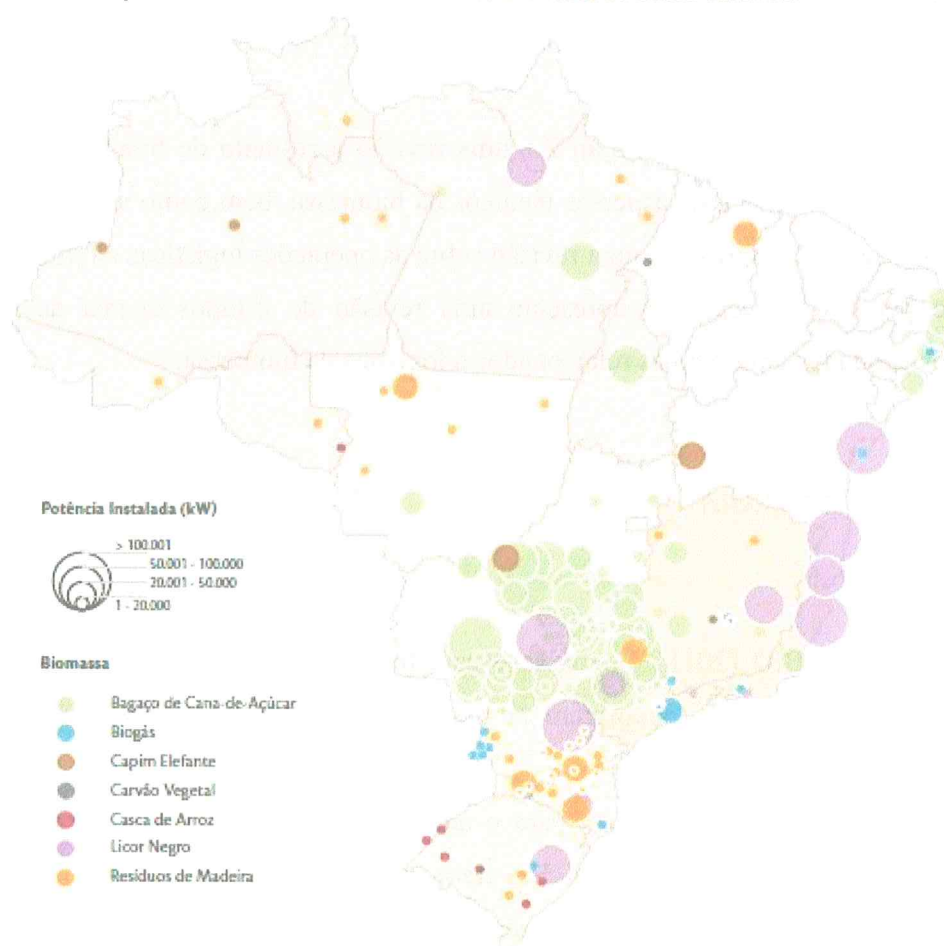
2.1 BIOMASSA E ENERGIA

Segundo CENBIO (2011), biomassa é caracterizada como “todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal e vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia”.

O Balanço Energético Nacional para o ano de 2013 indicou que a participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo (BRASIL, 2013). De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica (2008), tanto no mercado interno quanto no internacional, a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento.

De acordo com o Anuário Estatístico Abraf (2013), do percentual de 6,8% de energia elétrica gerada através de biomassa em 2012, incluindo lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações, a biomassa de base florestal representou 15,8% dessa geração. Na Figura 3 é possível visualizar a distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil em 2012, as fontes de biomassa que têm sido utilizadas e a potência instalada.

Figura 3 - Distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil em 2012.



Fonte: ANEEL, 2012.

O bagaço da cana-de-açúcar, o licor negro e os resíduos florestais são as principais biomassas utilizadas para a geração de energia elétrica no Brasil. Outras biomassas apresentadas na Figura 3 representam apenas 1,8% de energia gerada através de biomassa (ABRAF, 2013).

Apesar de significativo, o potencial de geração de energia a partir de resíduos florestais no Brasil é ainda maior. De acordo com o relatório da ABRAF de 2013, são gerados anualmente cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos madeireiros provindos da indústria de processamento de madeira e da colheita florestal, capazes de gerar o equivalente a 1,7 GW ao ano de energia.

Forsberg (2000) previu que a biomassa para a conversão de energia seria um dos recursos renováveis mais importantes no futuro dos sistemas de energia. Para Destouni e

Frank (2010), a principal opção de energia de biomassa para o futuro deverá ser baseada em resíduos florestais e agrícolas, juntamente com resíduos orgânicos. Para esses autores, em 2050, a contribuição da bioenergia deverá ser cerca de 20% da oferta global de energia e 10% da produção mundial de eletricidade.

O uso da biomassa tem sido discutido em decorrência das preocupações relacionadas à geração de energia e sustentabilidade, uma vez que “ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis” (ANEEL, 2008). Segundo Goldemberg (2004), cerca de 80% do consumo mundial de energia primária é baseada em combustíveis fósseis e a queima destes combustíveis é a principal responsável pela emissão de dióxido de carbono (CO₂), um dos responsáveis pelo aquecimento global e as mudanças climáticas.

A biomassa é capaz de produzir calor, que, em processos específicos, é convertido em energia. Esta energia é resultado da combustão de materiais orgânicos como restos de madeira (cavaco, serragem, maravalha), o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, casca de arroz, cascas de café e restos de milho (folhas, colmo e sabugo), entre outros.

No entanto, o uso da biomassa depende de uma avaliação criteriosa da quantidade disponível, da sua qualidade, de uma análise referente às questões de mercado, de outros usos concorrentes e das tecnologias disponíveis para transformação de energia, entre outros fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais (FURTADO et al., 2012).

Durante muito tempo o termo biomassa foi associado ao desmatamento, devido ao uso primário como fonte de energia (lenha), sem preocupação com a temática ambiental. Goldemberg e Coelho (2004) chamam a atenção para a diferenciação da utilização da biomassa da forma tradicional, que leva ao desmatamento, em relação à forma moderna, que considera a geração de energia e produção de calor por meio dos resíduos de origem agrícola e florestal, dentre outros. Os autores citam ainda que esta nova utilização deveria ser rotulada como “fontes de energia renovável sustentável”.

Alinhada à utilização moderna e sustentável, a biomassa é uma boa opção de energia renovável, que, segundo Moreira (2011), contribui duplamente para a redução da concentração de gases de efeito estufa (GEE): no momento de seu crescimento, devido à absorção e armazenamento de carbono pela fotossíntese; e pela redução da emissão de carbono na sua substituição por combustíveis fósseis. Segundo Yan et al. (1997), as emissões de CO₂ são consideradas quase zero, uma vez que não existe nenhuma contribuição adicional

de carbono, por estar em equilíbrio com a quantidade absorvida pelas florestas de onde se originam as respectivas biomassas.

Os custos elevados de energia elétrica (YOKOTA, 2012), e a necessidade de um desenvolvimento sustentável têm levado a preocupações ambientais que fomentam o uso de fontes renováveis de combustíveis. O caráter não renovável dos combustíveis fósseis, sua alta participação na matriz energética e a alta contaminação atmosférica, tem se convertido na força que tem incentivado a investigação de fontes alternativas de geração de energia (MARIN; VELÁSQUEZ; CÁRDENAS, 2011).

Para Vidal e Hora (2008) as principais vantagens técnicas da biomassa são sua grande diversidade e o fato de que seu aproveitamento pode ser feito pela combustão simples em fornos e caldeiras. Em relação à oferta, os autores consideram que os resíduos florestais e industriais são a maior oportunidade no curto prazo, no entanto, é necessário maior desenvolvimento logístico para seu aproveitamento.

No mesmo sentido, YAN et al. (1997) atestam que o principal desafio para o uso da biomassa para geração de energia é desenvolver sistemas mais eficientes e de baixo custo. Moreira (2011) destaca também que é fundamental levar em consideração os custos de coleta e a logística do aproveitamento da biomassa florestal para avaliar o seu verdadeiro potencial técnico e econômico.

Apesar da necessidade de sistemas mais eficientes, é possível afirmar que “a utilização desses resíduos em sistemas de cogeração² tem sido uma alternativa economicamente rentável” (Furtado et al. 2012).

Vários projetos têm se mostrado eficientes em substituição aos combustíveis fósseis:

- O projeto pioneiro de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis “GASEIBRAS – Nacionalização da tecnologia de gaseificação de biomassa e formação de recursos humanos da Região Norte” foi desenvolvido para uma comunidade isolada no estado do Amazonas. O sistema utiliza a casca do cupuaçu como resíduo *in natura*, o que implicou em melhorias ambientais, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis em 80%. O projeto, além de diminuir a

² Cogeração: “é a produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível. O processo mais comum é a produção de eletricidade e energia térmica”(COGEN, 2014).

dependência dos combustíveis fósseis, muitas vezes é a única alternativa de fornecimento de energia nestas localidades e ainda incentiva o desenvolvimento de atividades econômicas locais, tal como a extração da polpa do cupuaçu para comercialização (COELHO et al. 2006).

- A Usina termelétrica de São Borja, no Rio Grande do Sul, é a maior unidade de geração de energia a partir da casca de arroz no Brasil. A casca geralmente é descartada em aterros e não tem valor comercial. Assim, a sua utilização soluciona um problema ambiental e diminui o custo da energia. Estima-se que, do total de energia gerada, 10% seja para alimentação da usina e 90% comercializada em rede pública. A escolha dessa matriz energética deve-se ao fato de o Rio Grande do Sul ser o estado com maior produção de arroz (AGÊNCIA AMBIENTE E ENERGIA, 2012). A existência de uma agroindústria forte e com grandes plantações é uma pré-condição para produção de energia elétrica baseada em biomassa em larga escala (ANEEL, 2008).
- A empresa AmBev, de Viamão (RS), também utiliza a casca de arroz como combustível desde 2006, após investir R\$ 18 milhões para a mudança da matriz energética. Incluindo as outras unidades da empresa que também estão operando com biomassa, 32% de todo o calor gerado pelas caldeiras do grupo vem da biomassa (AS, 2010).
- No setor sucroalcooleiro o uso dos resíduos da cana-de-açúcar como material energético já é uma prática consolidada. Apesar das eficiências de utilização ainda não serem satisfatórias, o setor apresenta os maiores avanços em pesquisa e desenvolvimento. De acordo com a Matriz Energética Nacional para 2030 (BRASIL, 2007), a expansão do bagaço da cana passará de 70 (10^6 ton) em 2010, para 154 (10^6 ton) em 2030 e a palha da cana de 73 (10^6 ton) em 2010 para 160 (10^6 ton) em 2030. Esta evolução está associada à expansão da produção de cana-de-açúcar.

De forma geral, o Brasil possui muita energia sendo gerada através de biomassa. De acordo com o Banco de Informações de Geração Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em 2008 existiam 302 termelétricas movidas à biomassa no país, que correspondem a 5,7 mil MW (megawatts) instalados.

Ao contrário do que ocorre com outras fontes, como carvão, energia hidráulica e

petróleo, é difícil contabilizar a biomassa com precisão. Um dos fatores pelo qual ocorre essa imprecisão da quantificação é a dispersão da matéria-prima (qualquer galho de árvore pode ser considerado biomassa), e o outro é a pulverização do consumo, visto que a biomassa é utilizada em unidades de pequeno porte e distantes dos grandes centros (ANEEL, 2008).

2.1.1 Caracterização da Biomassa

A biomassa pode ser caracterizada de acordo com sua origem, que pode ser florestal, agrícola ou a partir de rejeitos urbanos e industriais (ANEEL, 2008). As categorias florestal e agrícola serão discutidas na sequência; no entanto, a categoria dos rejeitos urbanos e industriais não será objeto de estudo neste trabalho.

2.1.1.1 Categoria Florestal

Dentro da categoria florestal, o principal material utilizado é a madeira e seus derivados. Em se tratando de resíduos de madeira, o percentual de descarte é muito alto. Segundo Galvão Junior (2003), desde o corte nas florestas até a manufatura, existe um aproveitamento entre 30% e 40%, ou seja, essas atividades podem gerar entre 60% e 70% de resíduos. Para os resíduos de madeira em tora, considerando apenas aqueles gerados na fase de processamento, o percentual de aproveitamento é de 50%, com um PCI (poder calorífico inferior) de 2.000 kcal/kg (COELHO; MONTEIRO; KARNIOL, 2012).

Quanto às perdas da madeira na colheita florestal, os volumes são representativos, chegando a valores entre 2 e 8% do volume de madeira colhida (FOELKEL, 2007). Já na indústria de transformação da madeira em lápis, pode-se ter um descarte de até 90% em relação à tora original (GENTIL, 2008).

A serragem originária do beneficiamento da madeira é estimada em 30% do total da madeira processada (RODRIGUES et al., 2002).

Ainda na categoria florestal pode-se incluir a poda urbana, que é um material que também pode ser utilizado como fonte de energia. Os resíduos provenientes da poda urbana podem ser considerados um problema, levando em consideração seu descarte impróprio (nos lixões) e as técnicas cada vez mais onerosas para seu tratamento. A disposição deste tipo de resíduo em locais abertos (aterros ou lixões), misturados com outros resíduos pré-existentes, podem causar impactos negativos sobre a qualidade do ar, do solo e da água (CORTEZ et al. 2008).

Segundo Cortez et al. (2008), em levantamento realizado com 24 municípios da área de concessão da AES Eletropaulo, os resultados mostram que 50% dos resíduos de poda urbana são descartados em lixões e aterros sanitários, 8% são destinados para compostagem e apenas 42% dos resíduos são destinados para reciclagem, que se refere à biomassa utilizada em caldeiras como fonte de energia. Os autores também reconhecem a necessidade de uma estratégia mais adequada para o manejo desses resíduos.

2.1.1.2 Categoria Agrícola

Dentro da categoria de origem agrícola há uma diversidade de fontes que podem ser utilizadas como biomassa, dentre elas: soja, arroz, milho, cana-de-açúcar, cupuaçu, coco, laranja, café, amendoim entre outras.

Do milho, por exemplo, é possível utilizar como matéria-prima, o sabugo, o colmo, a folha e a palha; da soja e do arroz, os resíduos que permanecem no campo, ou seja, a palha (ANEEL, 2008); do cupuaçu, do coco, da laranja, do amendoim, do café, entre outras fontes, podem ser aproveitadas as cascas.

Do amendoim, 30% do seu peso total são considerados resíduos (COELHO, MONTEIRO e KARNIOL, 2012), sendo que o poder calorífico inferior (PCI) dessa casca é 4.281,82 kcal/kg (COELHO, PALETTA e FREITAS, 2000). Já o coco, com um percentual bastante elevado de resíduo, que corresponde a 60% do seu peso (COELHO, MONTEIRO e KARNIOL, 2012), tem um PCI de 4.556,82 kcal/kg (COELHO, PALETTA e FREITAS, 2000);

Da cana-de-açúcar, podem ser utilizados o bagaço, a palha e o vinhoto. Fora o grande

volume disponível dessa cultura no país, a participação dela é importante em termos de diversificação da matriz energética e também porque a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde estão instaladas as potenciais hidrelétricas do país (ANEEL, 2008).

O bagaço da cana-de-açúcar é o principal insumo para garantir a autossuficiência energética das usinas, que inclusive vendem o excedente de energia produzida por meio da cogeração. O uso do bagaço não fica restrito apenas às usinas sucroalcooleiras, mas também é consumido por outras indústrias. A usina São Martinho, por exemplo, comercializa em média 450 mil toneladas por safra, o que excede à sua utilização. Outro grupo empresarial que também vende o excedente de bagaço é a COSAN, maior grupo sucroalcooleiro do país (AS, 2010).

Assim como o bagaço da cana-de-açúcar, o arroz também tem grande importância na matriz energética. Sua casca é aproveitada como resíduo agrícola, que corresponde a 30% do seu peso total (COELHO, MONTEIRO e KARNIOL, 2012), com um PCI de 3.384,09 kcal/kg (COELHO, PALETTA e FREITAS, 2000).

A casca do arroz era um resíduo problemático nas décadas de 1980 e 1990. Devido a sua baixa densidade, ela era levada pelo vento e obstruía a rede de captação de águas pluviais. Já em 2010, a casca de arroz estava quase totalmente aproveitada, quase dois milhões de toneladas eram produzidas por safra e vendidas para o abastecimento de caldeiras (AS, 2010).

Delivand, Barz e Gheewala (2011) analisaram os custos logísticos para geração de energia através da casca de arroz na Tailândia. Os pesquisadores afirmam que tratar a palha de arroz como fonte de energia pode melhorar a qualidade do ar, reduzir as importações de energia e resolver o problema de descarte.

2.1.2 Aspectos técnicos da biomassa

De acordo com Furtado et al. (2012), deve-se considerar que as propriedades físicas e químicas da biomassa são alteradas de acordo com o tratamento aplicado a cada tipo de material, desde a colheita até o uso final. As principais propriedades que podem ser alteradas são: teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico. Quirino et al. (2005) também

consideram a densidade do material como uma propriedade importante. Assim, torna-se necessário o controle das variações para otimização do uso da biomassa para geração de energia.

2.1.2.1 Densidade, teor de umidade e poder calorífico

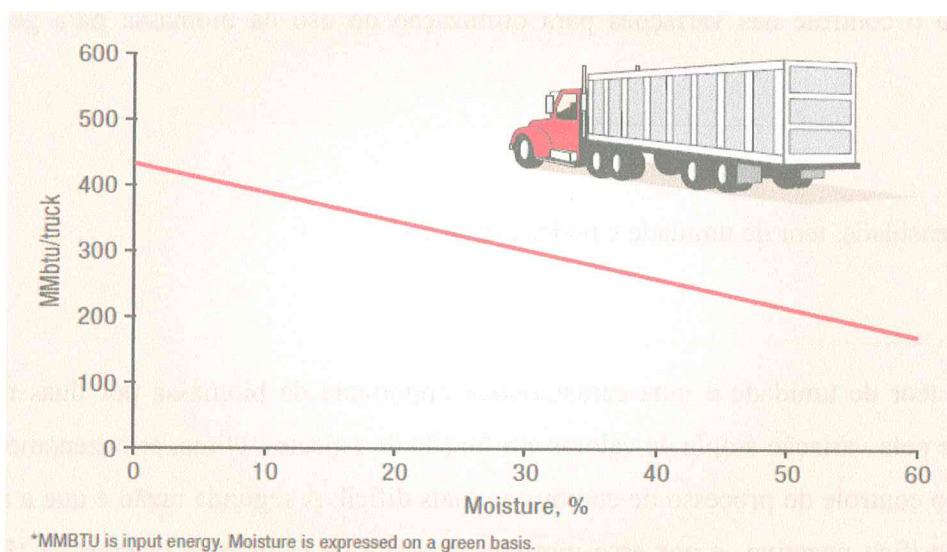
O teor de umidade é uma característica importante da biomassa por duas razões. A primeira é pela variação ampla de valores em função de espécies, clima, armazenamento, etc., tornando o controle do processo de combustão mais difícil. A segunda razão é que a água tem poder calorífico negativo, e por esse motivo, necessita de calor para evaporá-la (BRITO e BARRICHELLO, 1979).

De acordo com Simioni e Hoeflich (2010), o teor de umidade da biomassa está diretamente relacionado com o poder calorífico, e quanto maior a umidade, menor o poder calorífico gerado. Esta característica implica na utilização de um volume de biomassa maior para geração da mesma quantidade de energia em relação a outras fontes. Esse fator é utilizado como critério na determinação do preço da biomassa.

Devido à umidade elevada dos resíduos, há um maior peso a ser transportado e menos energia líquida disponibilizada na caldeira, pois parte da energia gerada será desperdiçada para evaporar a água contida no resíduo (FOELKEL, 2007).

Para Kimmerer e Ventures (2012) a biomassa com alto teor de umidade representa problemas para toda a cadeia de suprimentos se não for adequadamente gerenciada da floresta até a caldeira, pois representa aumento de custos e reduz o valor do material enquanto combustível. É possível verificar através da Figura 4, que ocorre uma queda da energia transportada pelo caminhão à medida que o teor de umidade aumenta.

Figura 4 - Energia transportada pelo caminhão em relação ao teor de umidade.



Fonte: Kimmerer e Ventures (2012).

Dessa maneira torna-se importante que a umidade seja a menor possível, reduzindo assim o manejo, o custo de transporte e agregando valor à biomassa.

Segundo Brito e Barrichello (1979), uma das mais importantes propriedades dos combustíveis é o seu poder calorífico, o qual usualmente é obtido pela queima de uma quantidade conhecida de combustível, medindo-se o calor liberado. No caso da madeira pode-se encontrar valores desde 3.000 kcal/kg até 5.400 kcal/kg com média de 4.200 kcal/kg.

Quirino et al. (2004) na análise de 258 espécies de madeira chegaram a um poder calorífico médio de 4.710 kcal/kg e concluíram que o poder calorífico superior da madeira de diferentes espécies varia relativamente pouco.

Furtado et al. (2012), encontraram valores médios de poder calorífico bem próximos aos encontrados por Brito e Barrichello (1979) e concluíram que o poder calorífico é altamente influenciado pela constituição química do material.

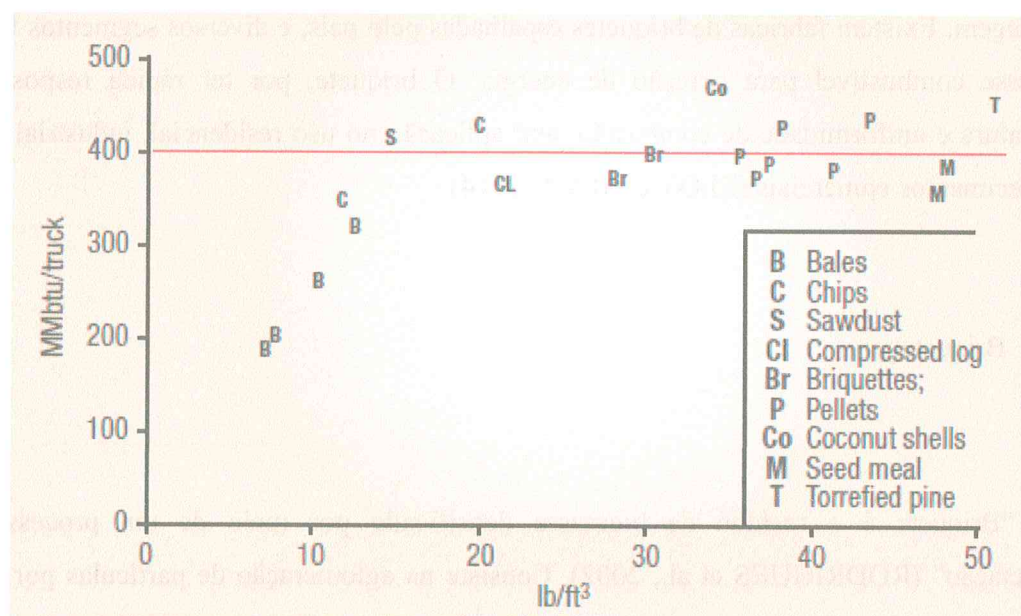
Além da umidade e do poder calorífico, a baixa densidade e a necessidade de densificação da biomassa também merecem atenção. A manufatura de peletes³ para exportação da América do Norte para a Europa está se tornando um mercado importante, porém, a economia de consumo de biomassa é diferente em determinadas regiões. Para os produtores de energia norte-americanos, por exemplo, a conveniência adicional proporcionada

³ Pelete: produto gerado a partir de um processo de densificação de resíduo, a peletização.

pelos peletes, em função do adensamento, ainda não justifica seu alto custo (KIMMERER e VENTURES, 2012).

Os mesmos autores citam que, muitas vezes a densificação da biomassa é vista como uma solução para a baixa densidade do material, porém, é possível notar na Figura 5 - Combustível por caminhão., que isto não é necessariamente justificado. A Figura 5 mostra que um limite de 400 MMBTU⁴, referente à energia contida na biomassa transportada, é atingido por vários materiais, considerando um veículo com peso bruto de 40 toneladas. Isto ocorre devido às limitações de peso e volume dos caminhões além do poder calorífico de cada material.

Figura 5 - Combustível por caminhão.



Fonte: Kimmerer e Ventures (2012).

Também é possível notar que a densidade adicional oferecida por briquetes, peletes ou torrefação⁵ não leva a um aumento substancial da entrega de energia por caminhão (KIMMERER e VENTURES, 2012).

4 MMBTU: Million Metric British Thermal Units - "Um milhão de unidades térmicas Britânicas" - é uma unidade de medida não-métrica.

5 Torrefação: pode ser definida como um processo de pré-carbonização do qual resulta um material intermediário entre a biomassa e o carvão, com altos rendimentos energéticos (FELFLI, LUENGO e SOLER, 2003).

2.1.3 Densificação de resíduos

Apesar de a biomassa apresentar algumas vantagens em comparação aos combustíveis fósseis, ela apresenta também desvantagens já citadas anteriormente, tais como: baixa densidade, grande volume, alto teor de umidade, além de coleta, armazenamento e transporte complexos. Segundo Migliorini (1980), uma maneira de eliminar essas características é o processo de densificação, que consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem adição de ligantes ou tratamento térmico.

Dentre as formas de densificação da biomassa, uma forma bastante conhecida é a briquetagem. Existem fábricas de briquetes espalhadas pelo país, e diversos segmentos fazem uso desse combustível para geração de energia. O briquete, por ter rápida resposta de temperatura e uniformidade de combustão, tem aplicação no uso residencial, industrial e em estabelecimentos comerciais (ELOY e SILVA, 2014).

2.1.3.1 Briquetagem

“Briquete é o resíduo de biomassa densificado por meio de um processo de compactação” (RODRIGUES et al., 2002). Consiste na aglomeração de partículas por meio de pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto compactado, com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados (SANTOS et al., 2011).

A primeira patente de briquetagem surgiu em 1848, concedida a William Easby. O processo desenvolvido por Easby possibilita a formação de aglomerados sólidos de tamanho e formas variadas, a partir de frações finas de carvão, por meio de pressão sobre esse material. Esse processo transforma materiais de pequeno ou quase nenhum valor agregado em um produto de elevado valor combustível para máquinas a vapor, forjas, culinária e outras aplicações (BRINCK; CARVALHO, 2004).

Segundo os mesmos autores, no Brasil, o processo de briquetagem surgiu na década de

60 na Companhia Siderúrgica Belgo Mineira – CSBM, na usina de João Monlevade/MG, para briquetagem de finos de carvão vegetal.

O briquete possui um poder calorífico maior que a lenha comum, além de ser ecologicamente correto. Uma tonelada de briquete substitui até 7m³ de lenha comum (AS, 2012; DE ANGELIS, 2007).

O processo de briquetagem constitui uma boa alternativa tecnológica para se produzir energia de forma mais econômica e apresenta vantagens, principalmente em relação à energia das termoelétricas, como: baixo custo de operação, proteção ao meio ambiente e custo reduzido no transporte (REIS et al., 2002). Outras vantagens apontadas por Rodrigues et al. (2002), Migliorini (1980) e Junginger et al. (2011) são o aumento da densidade, melhorando o armazenamento e transporte; o aumento da eficiência energética; a melhoria do manuseio do resíduo; diminuição da sujeira nos equipamentos e redução dos custos de transporte (Granada et al., 2002).

Em 2008, a densificação, no formato de peletes, apresentou uma produção mundial de 11,2 milhões de toneladas, sendo 8 milhões de toneladas produzidas em 30 países europeus, 1,8 milhões de toneladas nos Estados Unidos e 1,4 milhões de toneladas no Canadá (JUNGINGER, et al. 2011).

A densificação de resíduos no Brasil é modesta. Em 2010, foram produzidas 47 mil toneladas, enquanto a produção mundial foi de 16 milhões de toneladas, sendo a Europa responsável pela produção de 67% e a América do Norte 30% do total (ABRAF, 2013).

Esforços de pesquisa têm sido realizados para avaliar as características dos resíduos densificados e seus potenciais benefícios, o que constitui o objeto de estudo deste trabalho.

Protásio et al. (2011) avaliaram briquetes produzidos a partir de casca de café, serragem de eucalipto e resíduos da colheita do milho, e a influência do tempo após a compactação em algumas propriedades dos briquetes como a umidade, a expansão volumétrica e a densidade aparente. Os autores sugerem que na utilização de briquetes para a produção de bioenergia, seja avaliada a variação da densidade dos mesmos, pois uma diminuição de densidade, conforme citado anteriormente, pode elevar os custos de transporte.

Liu et al. (2013) de maneira semelhante, investigaram os efeitos das condições de carbonização (temperatura e tempo) nas propriedades físicas de peletes de bambu. Os resultados indicaram que as propriedades dos peletes carbonizados atenderam aos requisitos

necessários para combustíveis, com isso o material tem grande potencial como recurso energético do futuro da China.

Gonçalves, Sartori e Leão (2009), avaliaram a produção de briquetes de resíduos madeiros de *Eucalyptus grandis* misturados com rejeitos de resíduos sólidos urbanos, e seu uso para a geração de energia. Os resultados indicaram a viabilidade dessa produção, ressaltando a necessidade de maior análise de estudos sobre os componentes das cinzas e emissão de gases.

Paula et al. (2011) produziram e avaliaram briquetes feitos a partir de vários resíduos de biomassa vegetal e testaram diferentes tempos e temperaturas de briquetagem. Dentre os materiais utilizados, os resultados indicaram que o maior índice de combustão foi encontrado para os briquetes derivados de resíduos provenientes do feijão e a maior densidade e mais alta resistência mecânica foram encontradas nos briquetes de casca de arroz. Quanto à análise de tempo e temperatura da briquetagem, os autores concluíram que eles interferem na resistência mecânica dos briquetes. Há uma tendência de aumento da resistência mecânica à medida que o tempo da briquetagem aumenta. Para dois tipos de resíduos também observou-se a tendência de aumento de resistência mediante a elevação da temperatura de briquetagem.

Franco et al. (2011) recomendam a utilização da casca de arroz para produção de briquetes. Em seu trabalho analisaram a densidade, teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico, dentre outras características, e concluíram que esse material é viável para fabricação de briquetes.

De Angelis et al. (2007) propuseram uma nova destinação aos resíduos de poda de árvores do município de Maringá, Estado do Paraná. Foram analisados dois tipos de destinação final: a utilização como lenha e a fabricação de briquetes, por apresentarem maior valor agregado. A venda do briquete apresentou uma receita 50% maior em comparação à venda da lenha.

Furtado et al. (2010) analisaram se a matéria-prima tem influência na qualidade do briquete e verificaram também o efeito da pressão aplicada durante o processo nas características energéticas e mecânicas do produto final. Os autores avaliaram também a qualidade da mistura de diferentes materiais, em comparação ao uso de materiais puros. Concluíram que o *mix* pode ser utilizado sem nenhum prejuízo para a qualidade do briquete e que a matéria-prima tem maior influência sobre a qualidade dos briquetes do que outras variáveis do processo.

Ainda em relação à matéria-prima utilizada para a fabricação do briquete, Gentil (2008) ressalta em seu trabalho que o uso de resíduos mais secos deve ser preferido, pois 76,63% de toda energia utilizada para a fabricação de briquetes é usada para a secagem do material.

2.2 OPERAÇÕES LOGÍSTICAS COM BIOMASSA

O *Council of Supply Chain Management Professionals* – CSCMP (2013) define a logística como o processo de planejamento, implementação e controle para um eficaz e eficiente transporte e armazenamento de mercadorias, incluindo os serviços e informações relacionados a eles desde o ponto de origem até o ponto de consumo a fim de atender às exigências do cliente.

Antigamente, as mercadorias não eram disponíveis perto de seu consumo, nem estavam disponíveis no momento da procura. A inexistência de sistemas desenvolvidos de transporte e armazenamento obrigava as pessoas a viverem mais próximas às fontes de produção e as limitavam ao consumo de determinadas mercadorias (BALLOU, 2004).

Hoje no setor de biomassa vivencia-se uma situação semelhante. Lima et al. (2006), citam que a substituição das atuais fontes de energia se depara com limitações geográficas, principalmente relacionadas às distâncias a serem percorridas, uma vez que o custo total da biomassa é influenciado pelo frete.

De acordo com Ballou (2004), à medida que os sistemas logísticos são aperfeiçoados, o consumo e a produção experimentam uma separação geográfica. Assim, melhorias nos sistemas logísticos podem aumentar o acesso da biomassa para uso em grandes distâncias. Da mesma maneira, métodos que melhor gerenciem esses resíduos nos pátios das indústrias também são muito importantes para evitar problemas como a deterioração, que compromete seu uso como fonte energética.

A logística de abastecimento de combustíveis obtidos a partir de biomassa é susceptível de ser complexa e potencialmente problemática. Segundo Kimmerer e Ventures (2012) as cadeias de abastecimento de biomassa são ineficientes, reduzem as receitas aos produtores de biomassa e aumentam os custos para os consumidores. Os autores justificam a

ineficiência pela falta de qualidade da biomassa que chega aos consumidores.

Os custos de logística têm um impacto importante sobre o custo total do fornecimento de biomassa (ALLEN et al. 1998). Estudos evidenciam que os valores de combustíveis provenientes de resíduos de biomassa de base florestal são mais convenientes sob os aspectos de custo e ambiental, porém, as questões logísticas têm oferecido empecilhos à sua utilização (GALVÃO JUNIOR, 2003).

Segundo Allen et al. (1998), a cadeia de fornecimento de biomassa é feita por um conjunto de atividades, dentre as quais incluem-se a preparação do solo e plantio, cultivo, colheita, manuseio, armazenagem, transporte no campo e o transporte até a estação de energia. Geralmente, o transporte rodoviário é o único meio possível para a coleta da biomassa.

Silva (2011) avaliou cenários logísticos de colheita de cana de açúcar com integração do recolhimento da palha por meio de simulação discreta. Dos cenários testados, o que apresentou melhor desempenho foi a colheita mecanizada convencional de cana-de-açúcar, com enfardamento da biomassa e carregamento dos fardos diretamente em caminhões.

As atividades que ocorrem nas cadeias de abastecimento de combustíveis obtidos a partir de biomassa devem ser altamente interligadas, de modo a garantir que a biomassa chegue ao destino desejado, no momento certo, na quantidade certa e com a qualidade esperada, de modo a não agregar maiores custos.

Para Kimmerer e Ventures (2012) os consumidores e fornecedores de biomassa deveriam trabalhar juntos para desenvolver uma cadeia de fornecimento de alta eficiência. Muitos fornecedores não possuem alto nível de sofisticação em suas operações e não possuem condições de adquirir equipamentos caros, impedindo-os de entrar no mercado. Segundo os autores, os consumidores que visam utilizar biomassa deveriam fornecer apoio financeiro para agregar valor a essa cadeia de abastecimento. A garantia de que a biomassa é de alta qualidade no momento da entrega reduz custos e melhora a eficiência da cogeração.

Zhang, Johnson e Johnson (2012) acreditam que o desenvolvimento de um sistema de abastecimento consistente e economicamente viável necessita abordar diversos cenários de colheita e transporte de biomassa. Além disso, os autores creem que uma cadeia otimizada de

colheita, coleta, e infraestrutura do transporte é a chave para a viabilidade de uma biorrefinaria⁶.

Kim, Realf e Lee (2011) destacam o alto nível de incerteza das cadeias de fornecimento de biomassa, nos valores de oferta, na demanda de mercado, nos preços de mercado e tecnologias de processamento. Essas incertezas dificultam a avaliação das decisões de investimento.

Para corroborar com estes conceitos mencionados, Marvin et al. (2012) acreditam que a coleta e o transporte de biomassa de maneira eficiente são os principais obstáculos que devem ser superados para atender a necessidade de aumento da produção de biocombustíveis.

2.2.1 Transporte de biomassa

De modo geral, o aproveitamento de biomassa envolve duas fases distintas: fase de campo e fase industrial. A fase de campo envolve as operações de corte, separação, picagem, enfardamento, carregamento e transporte. A fase industrial envolve operações de descarregamento, secagem, armazenamento do material e abastecimento da caldeira (SALMERON, 1980). Das fases citadas, no presente estudo foram consideradas as operações de carregamento, transporte e descarregamento.

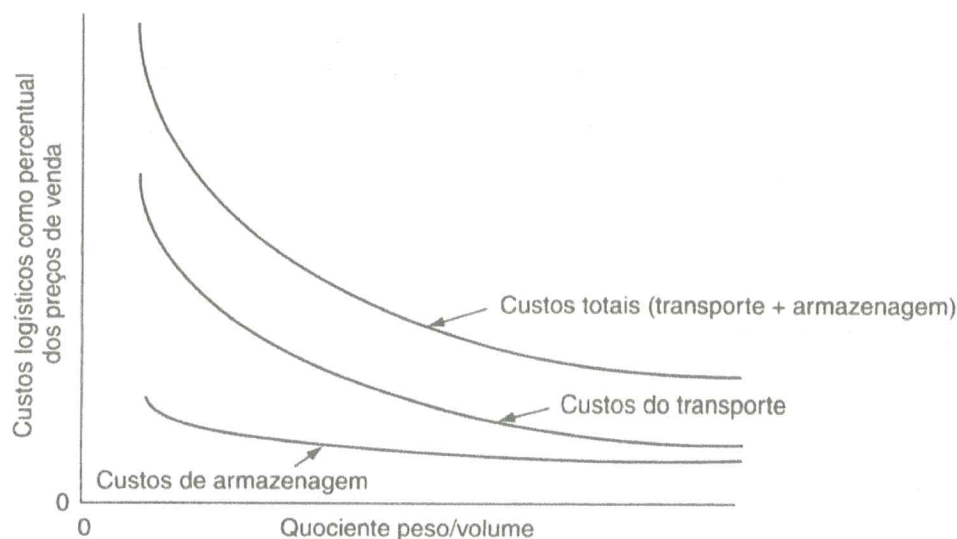
O transporte desses resíduos consiste na movimentação desde a sua origem até o local de consumo ou pátio das empresas. No Brasil esse transporte pode ser realizado por diversos meios, sendo que o transporte rodoviário representa 85% do transporte florestal e 62% de todos os produtos transportados no país (SILVA et al. 2007).

De acordo com Silva et al. (2007), o custo de transporte torna-se relativamente alto para produtos com baixo valor, que é o caso dos resíduos florestais. O custo varia diretamente com a distância percorrida, com isso, as localizações das fábricas e dos reflorestamentos são decisões estratégicas e requerem planejamento detalhado.

⁶ Biorrefinaria: fábricas que operam com biomassa para manufatura de bioprodutos e biocombustíveis, em similaridade às refinarias de petróleo. O prefixo bio foi introduzido para indicar que essas fábricas devem ser tão eficientes quanto às refinarias de petróleo, mas usando matérias-primas verdes e renováveis de biomassa (FOELKEL, 2012).

Esses custos estão diretamente relacionados com o quociente peso-volume dos produtos (BALLOU, 2004), ou seja, produtos densos apresentam menores custos de transporte e armazenagem (Figura 6). Esse fato justifica a recomendação da compactação da biomassa para elevação da sua densidade.

Figura 6 - Efeito geral da densidade sobre os custos logísticos.



Fonte: Ballou (2004).

Contudo, para produtos de baixa densidade, o volume de capacidade do equipamento de transporte é totalmente utilizado antes que o limite de peso seja atingido. O mesmo efeito acontece com os espaços de armazenagem, tornando assim os custos logísticos elevados para esse tipo de produto.

Uma das maneiras de tentar diminuir o custo em percursos de longa distância tem sido a utilização de veículos com maior capacidade de carga (LEITE, 1992), contudo é preciso atentar para que os limites estabelecidos pela legislação não sejam ultrapassados.

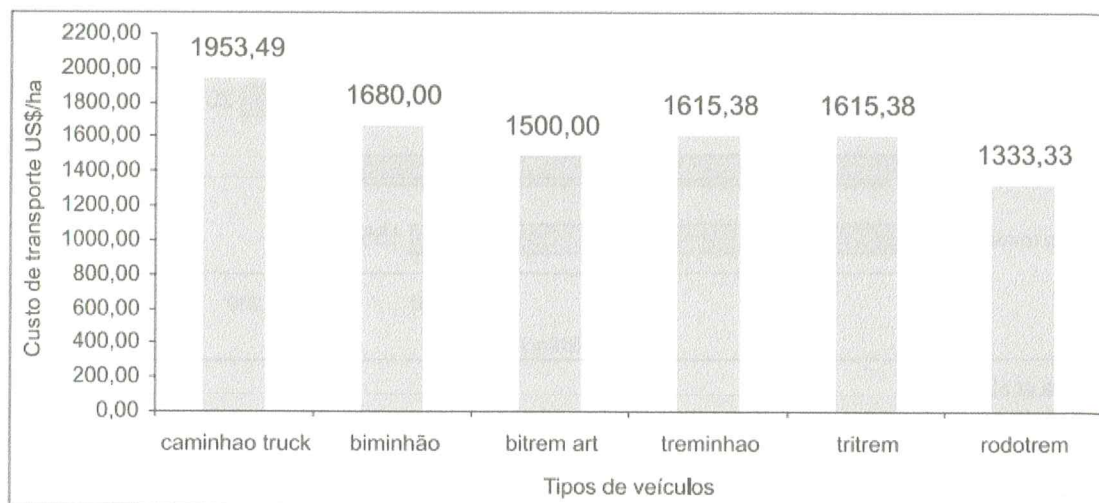
De acordo com os resultados de Silva et al. (2007), na Figura 7, é possível verificar que um veículo com maior capacidade de carga permite reduzir o custo de transporte. Apesar da capacidade de carga em toneladas do rodotrem⁷ ser bem superior à capacidade do truck⁸, o que mais limita o transporte de resíduos, não é o peso e sim o volume. Assim, os autores

⁷ Rodotrem: é uma combinação de veículos de carga (dois semi-reboques) composta por um total de 9 eixos que permite o transporte de um peso bruto de 74 toneladas (COELHO, 2010).

⁸ Truck: caminhão que tem eixo duplo na carroceria, ou seja, dois eixos juntos. Sua capacidade é de 10 a 14 toneladas, possui peso bruto de 23 toneladas e seu comprimento é de 14 metros (COELHO, 2010).

afirmam que o volume transportado por esses caminhões não é tão discrepante em relação à capacidade em toneladas transportadas, e por isso, os custos de transporte entre os veículos não são proporcionais à carga transportada.

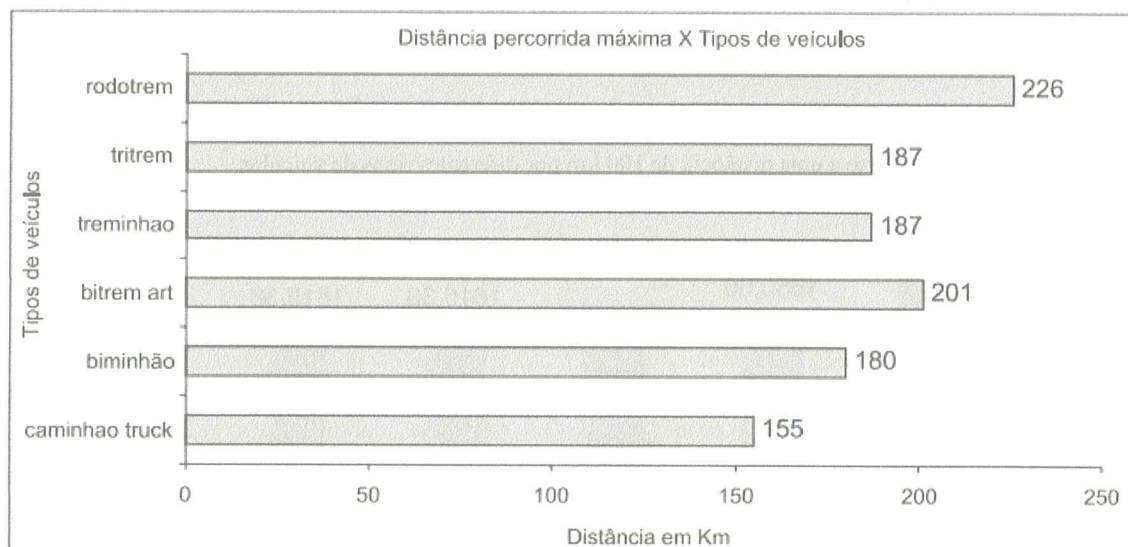
Figura 7 - Custo de transporte a uma distância de 100 km por diferentes tipos de veículos.



Fonte: Silva et al. (2007).

De acordo com os mesmos autores é possível observar na Figura 8 que, a partir de um mesmo custo para a operação de transporte, com veículos maiores é possível percorrer uma distância maior em relação aos veículos menores. No caso, o rodotrem percorre uma distância de 226 km enquanto o truck ficou limitado a uma distância máxima de 155 km.

Figura 8 - Distância máxima percorrida pelos diferentes tipos de veículos.



Fonte: Silva et al. (2007).

Analisando ambas as figuras 7 e 8 é possível verificar que o veículo truck apresenta o pior desempenho dentre as opções de veículos, pois seu custo é 46% maior que o do rodotrem e a distância viável de transporte é 46,5% menor que a do rodotrem.

O quociente peso-volume não é o único critério que influencia os custos logísticos dos produtos; o quociente valor-peso do produto também tem grande influência. Quando o valor do produto é baixo, os custos do transporte representam uma alta parcela do preço do produto.

A armazenagem também é influenciada pelo peso-volume dos produtos, sendo um tema bastante importante dentro da logística da biomassa.

Segundo Allen et al. 1998, quando não se trabalha com estoques na estação de energia aumenta-se a importância de transporte confiável e flexível. Ou seja, se não existe um estoque de biomassa e a caldeira precisa funcionar de maneira ininterrupta, a exigência de um sistema eficiente será ainda maior.

Levando em consideração essas abordagens referentes ao transporte, as influências do peso, do volume e dos custos dos materiais a serem transportados, os resíduos considerados no formato de briquetes podem interferir positivamente no transporte. Conforme destacado anteriormente, de acordo com Rodrigues et al. (2002), o processo de briquetagem aumenta a densidade do material e melhora sua armazenagem e transporte.

Além dos diferentes modais de transportes, existem também alternativas diversas para transportar esses resíduos quanto à forma, das quais três delas são destacadas: transporte do resíduo sem processamento, resíduo picado (a granel) e resíduo compactado.

No caso do resíduo sem processamento, o material é coletado no campo e levado diretamente para a unidade de transformação. O resíduo picado visa uniformizar o material para queima, facilitar o transporte e acelerar a secagem. Já o resíduo compactado visa facilitar o transporte e o manuseio. Para definição do tratamento que será aplicado ao resíduo é preciso levar em consideração três aspectos (SALMERON, 1980): o custo do processamento; o custo do transporte e a forma como o resíduo é requerido.

Outros fatores também influenciam o transporte de carga pelo modal rodoviário. Possui destaque o tipo de veículo, a distância do transporte, as condições em que se encontra a malha viária, o tempo de espera de carregamento e descarregamento, a capacidade de carga em volume que o veículo transporta as condições locais e regionais e os tipos de equipamentos de carregamento e descarregamento (MACHADO, 2000).

Goldemberg (1998) e Macedo (2001) confirmam que as principais barreiras existentes para maior utilização das energias renováveis são de ordem econômica. Os autores consideram que um dos fatores mais importantes na utilização de biomassa como insumo energético, independente da técnica empregada, refere-se ao custo de colheita e transporte dessa matéria-prima.

2.3 MÉTODOS QUANTITATIVOS APLICADOS À LOGÍSTICA COM BIOMASSA

Esta seção apresenta um resumo de estudos acerca dos métodos quantitativos aplicados a problemas relacionados com a logística da biomassa. Devido à complexidade dessas operações logísticas e à diversidade de opções de biomassa, métodos quantitativos tornam-se necessários para auxiliar a tomada de decisão ao se configurar as redes de abastecimento de biomassa.

Segundo Melo e Sousa (2000) os primeiros estudos sobre as técnicas de programação matemática, voltadas especificamente para as operações de transporte de madeira com dados fictícios surgem em congressos, conferências e simpósios na primeira metade da década de

60, e os primeiros estudos com dados empíricos aparecem somente na segunda metade da década de 60.

Em 1976, Berger e Engler desenvolveram modelos de programação linear com o objetivo de determinar a quantidade de madeira a ser transportada das regiões produtoras até os centros de consumo, visando uma minimização dos custos individuais de cada rota e os custos totais de transporte. Paralelamente, os autores determinaram os custos e raios médios de transporte para cada fonte consumidora. O trabalho considerou 3 períodos na modelagem (biênios) e dentre os resultados encontrados, a modelagem indicou as tendências de crescimento e declínio tanto dos custos como dos raios médios em cada período. Foi possível observar também as quantidades excedentes de madeira e o aumento da concorrência em cada período, bem como a tendência de crescimento da oferta.

Rodriguez e Lima (1985) demonstram o potencial da programação linear no setor florestal. Os autores desenvolveram dois modelos de programação linear para escolha da melhor estratégia de reforma de um povoamento de *Eucalyptus grandis*: o primeiro para determinar a estratégia de reforma que minimiza os custos, e o segundo para buscar a estratégia que maximize o desenvolvimento futuro do povoamento replantado. Os autores concluíram que a abordagem por programação linear se aplica de forma satisfatória a problemas deste tipo.

Considerando trabalhos mais recentes, Nagel (2000) utilizou um modelo de otimização linear inteira mista, para avaliar a utilização de biomassa a um nível regional. O objetivo foi encontrar a estrutura mais econômica de abastecimento. Os resultados mostraram que em determinados locais, o abastecimento com biomassa, já se encontrava viável. O estudo mostrou também que menores preços de fornecimento, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e o aumento dos preços de energia influenciam na viabilidade de utilização da biomassa, assim como a cogeração para aproveitamento do calor e a venda da energia gerada também podem aumentar essa viabilidade.

Galvão Junior (2003) propôs um modelo matemático para tratar do problema de coleta de biomassa de madeira para fins de geração de energia e vapor em uma planta de refino de açúcar de alta qualidade, localizada na região sul do Brasil. O problema foi dividido em duas partes devido à alta complexidade, sendo a primeira para a seleção dos potenciais fornecedores, considerando menor custo de resíduos e transporte e a segunda para determinar a frota de veículos necessária para coletar a biomassa. O problema em relação à seleção dos

fornecedores de biomassa foi solucionado de maneira satisfatória; já para a designação da frota necessária, foram observados tempos muito elevados de processamento, deixando como recomendação o uso de outros métodos para solucionar a questão.

Apesar de Galvão Junior (2003) ter considerado uma rede de fornecedores para atender um único cliente e dividir o problema em duas partes devido à complexidade, a abordagem foi bastante similar ao problema proposto neste trabalho. Porém, o autor não considerou algumas propriedades físicas relevantes da biomassa, tais como densidade, umidade e poder calorífico do material coletado, características que podem inviabilizar a utilização desses resíduos em determinadas situações.

Berger et al. (2003) desenvolveram um modelo de programação linear para auxiliar a determinação das rotas a serem seguidas por caminhões, com a finalidade de obter o menor custo possível e o máximo volume de madeira alocada no pátio. O método permitiu análises quanto ao número ideal de viagens, a carga ótima por veículo, o menor custo por unidade de volume e a quilometragem máxima mensal. Os resultados obtidos permitiram um aumento de 22,7% de volume de madeira alocada no pátio e uma redução de 18,3% no custo.

Rentizelas, Tatsiopoulos e Tolis (2009) trabalharam com tri-geração de energia (eletricidade, aquecimento e refrigeração) através da biomassa. Em virtude da não-linearidade do modelo, utilizaram um método híbrido. Como primeiro passo, utilizaram um algoritmo genético que teve a função de encontrar uma boa solução inicial para o problema; no segundo passo utilizaram um método de programação quadrática para encontrar o ótimo global. Dentre os resultados encontrados, o modelo forneceu o tamanho ideal e o local das instalações de bioenergia, bem como a mistura de tipos de biomassa a ser utilizada.

Dyken, Bakken e Skjelbred (2010) apresentaram um modelo de programação linear inteira, aplicado a componentes relevantes de uma cadeia de abastecimento de biomassa, tais como fontes de abastecimento, processamento, armazenamento e utilização final. O objetivo principal do estudo foi demonstrar a funcionalidade da metodologia apresentada. O resultado indicou que o modelo proposto possui flexibilidade para modelar cadeias com vários tipos de biomassa e várias tecnologias.

Zhu et al. (2011) analisaram os desafios na concepção de um sistema logístico para uma indústria dedicada a utilizar biomassa de gramíneas para energia. Para projetar o sistema logístico utilizaram um modelo de programação linear inteira mista, incluindo na modelagem o plantio, a colheita, a entrega e o tratamento dos resíduos. Os resultados mostraram que a

metodologia adotada auxilia a realização da produção comercial no setor de biomassa para bioenergia e que um sistema bem concebido, com fornecimento regular e suficiente de biomassa pode aumentar o lucro da unidade de bioenergia.

Nunes (2012), após identificar e caracterizar os pontos mais críticos das cadeias de abastecimento de biomassa, criou um modelo matemático para analisar várias estratégias de abastecimento. O modelo matemático e o sistema de apoio à decisão permitiram avaliar o impacto de diferentes estratégias nos custos. Verificou-se ainda, no estudo de caso analisado, que a sazonalidade da biomassa não é relevante. Os pontos mais críticos identificados nessa cadeia referem-se ao baixo preço de venda do produto final, aos custos de transporte elevados, à baixa densidade e ao alto teor de umidade do material.

Sharma et al. (2013) desenvolveram um modelo de otimização para uma cadeia de abastecimento de biomassa de uma biorrefinaria, sob condições de incertezas das mudanças climáticas. O modelo foi desenvolvido para uma cadeia de abastecimento de capim para uma biorrefinaria no Kansas/EUA, com o objetivo de minimizar os custos de fornecimento ao longo de um ano, usando intervalos de tempos mensais em diferentes cenários climáticos, considerando a colheita, o transporte e os custos de armazenamento. Os resultados indicaram que as horas de colheita influenciam as decisões dentro da cadeia de abastecimento de biomassa. O armazenamento do capim depende do custo e da perda de algumas características físicas da biomassa, sendo que o rendimento energético desse material é um fator crucial para determinar a viabilidade da cadeia de abastecimento.

A simulação também é uma técnica que tem sido utilizada nos problemas relacionados à logística com biomassa, apresentando resultados satisfatórios. Carvalho (2010) destaca que a simulação é uma ferramenta que tem sido fortemente utilizada, em particular na área de logística. Hillier e Lieberman (2006) apontam que a simulação é uma das técnicas chaves de pesquisa operacional, cuja popularidade é crescente por ser uma ferramenta flexível, poderosa e intuitiva.

Em 2001, Hall, Gigler e Sims, desenvolveram um modelo de simulação para estimar e comparar os custos logísticos de entrega de resíduos florestais a uma central de biomassa na Nova Zelândia. O objetivo do trabalho foi identificar sistemas de distribuição promissores, (incluindo a colheita, armazenamento, transporte e o processamento) de resíduos florestais para uma usina de energia e os custos associados. Os resultados indicaram que a utilização de resíduos florestais para geração de energia e/ou calor pode ser viável na Nova Zelândia. O

resultado mostrou também que as opções mais baratas tendiam aos sistemas mais simples, uma vez que custos extras eram adicionados ao processo com o tratamento do material. Ressaltam ainda os autores que o sistema mostrou-se uma ferramenta útil, porém, é importante que os parâmetros de entrada sejam estimados com precisão.

Silva (2011) desenvolveu um modelo de simulação discreta para representar os principais sistemas de colheita de cana-de-açúcar com manejo de biomassa integrado, com a finalidade de auxiliar nas tomadas de decisões operacionais desses sistemas. Mais especificamente, o trabalho abordou as relações causais que existiam entre as operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar com aproveitamento de biomassa e chegou à conclusão que o sistema com melhor desempenho foi a colheita convencional com aproveitamento de biomassa por meio do enfardamento e carregamento de fardos diretamente em caminhões.

Zhang, Johnson e Johnson (2012) desenvolveram um modelo de simulação para uma cadeia de fornecimento de biocombustíveis, considerando como atividades chave a colheita, o processamento, o transporte e o armazenamento. Foram utilizados os custos de matéria-prima, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa como critérios de desempenho do sistema. Os resultados mostraram que a simulação é uma ferramenta útil para a gestão da cadeia de suprimentos, incluindo a seleção da localização ideal da planta de biocombustíveis, o desempenho logístico, a gestão de estoques e a gestão de informação.

An e Searcy (2012) trabalharam com simulação para representar as operações e os custos de máquinas para produzir e manusear fardos de biomassa e identificar os fatores críticos do projeto para atingir um alto desempenho e baixo custo. Os resultados mostraram que a densidade da biomassa, a eficiência da colhedora, a velocidade e o tipo de caminhão provaram ser os fatores mais influentes para o desempenho desse sistema.

Além das técnicas relacionadas acima, várias outras tem sido utilizadas para estudos relacionados à biomassa, Lopes et al. (2003) aplicaram o programa *Schedulling and Network Analysis Program* (SNAP III) como ferramenta de apoio ao planejamento da colheita e do transporte florestal, em condições brasileiras, para a definição de subsistemas de colheita economicamente viáveis e rotas compatíveis para o transporte de madeira. O programa mostrou-se eficiente, podendo auxiliar no planejamento da colheita e do transporte e também foi capaz de definir adicionalmente de forma específica os subsistemas de colheita, a rota ótima do transporte e as estradas em uso em cada período do horizonte do planejamento.

Gomes e Maia (2012) desenvolveram um sistema de Decisão Multicritério para auxiliar a decidir qual tipo de biomassa uma empresa deveria utilizar para gerar energia. Foram selecionados cinco tipos de biomassa (bagaço de cana, licor negro, resíduos de madeira, biogás e casca de arroz) e identificados quatro critérios (número de usinas, potência, R\$/MW, produção) que permitem a comparação das cinco alternativas. Como resultado a pesquisa mostrou que a cogeração a partir do bagaço de cana tem se mostrado atraente, uma vez que combina baixo custo, eficiência e benefícios sociais.

Sun, Lin e Qian (2013) utilizaram um modelo de teoria dos jogos para uma cadeia de suprimento de biomassa constituída por um fornecedor e dois compradores, com a finalidade de desenvolver as melhores estratégias para fornecedor e comprador e o equilíbrio do lucro total.

Namuli et al. (2013) trabalharam com a heurística busca tabu na utilização de resíduos de biomassa para conversão de energia para a rede rural, com o objetivo de determinar o máximo rendimento que pode ser obtido nesses sistema, para um dado tamanho de rebanho. Os resultados mostraram que a otimização através da busca tabu, indicou um melhor aproveitamento da capacidade de geração instalada e uma economia de 48% nos custos para a fazenda estudada.

3 METODOLOGIA

Segundo Gil (2002), a pesquisa científica é definida como o procedimento racional e sistemático que tem por objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. Desenvolve-se ao longo de um processo que envolve diversas fases, desde a formulação adequada do problema até a análise e conclusão dos resultados.

Além da caracterização da pesquisa, este capítulo apresenta como a metodologia adotada neste trabalho foi estruturada. O capítulo está dividido em: caracterização da pesquisa, procedimentos de pesquisa, modelagem do problema de transporte de biomassa, e os estudos com o modelo matemático.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Quanto ao tipo de pesquisa adotado nesse trabalho, pode-se caracterizá-la como pesquisa exploratória, cujo objetivo principal é desenvolver ideias que visem fornecer hipóteses em condições de serem testadas em estudos posteriores. O planejamento da pesquisa exploratória reveste-se de flexibilidade frente a outros tipos de pesquisas. No entanto, devem-se conduzir os procedimentos de forma relativamente sistemática para obtenção das observações empíricas, bem como identificar as relações entre os fenômenos estudados (GIL, 2002).

Em relação ao método adotado, foi utilizado um modelo de transporte como ferramenta de pesquisa, aplicado a um estudo de caso. Mais especificamente o modelo foi implementado considerando uma rede de abastecimento de biomassa e várias estratégias logísticas, incluindo os resíduos na forma densificada. As várias estratégias foram testadas com o objetivo de analisar o impacto da densificação dos resíduos na rede logística e conseqüentemente nos custos de transporte.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), a pesquisa quantitativa baseada em modelos é definida como aquela onde os modelos de relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho são desenvolvidas, analisadas e testadas.

“...A utilização de modelos permite compreender melhor o ambiente em questão, identificar problemas, formular estratégias e oportunidades e apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisões” (MORABITO e PUREZA, 2010 p.166).

O estudo de caso foi escolhido porque é um dos métodos de pesquisa mais poderosos em gestão de operações. O estudo de caso não enriquece somente a teoria como também os próprios pesquisadores, através das realizações de pesquisas na área e exposição aos problemas reais. É muito importante que o estudo de caso seja bem conduzido, de modo que os resultados sejam rigorosos e relevantes. (VOSS, TSIKRIKTSIS e FROHLICH, 2002). Os autores ressaltam ainda que, quanto menor o número de casos, maior é a profundidade da observação.

3.2 PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os temas centrais da pesquisa: biomassa e energia, operações logísticas com biomassa e os métodos quantitativos aplicados à logística com biomassa, que proporcionaram ampliar o conhecimento sobre estas áreas e identificar lacunas a serem investigadas.

Na sequência foram realizadas visitas técnicas a três empresas que lidam com a biomassa para fins energéticos e com uma quarta empresa, do mesmo ramo, foi realizada consulta via e-mail e contatos telefônicos.

As visitas e contatos foram realizados para uma maior familiarização com o tema, para a coleta dos dados preliminares e a construção das questões de pesquisa. A coleta de dados e o pleno conhecimento do processo produtivo são essenciais para a caracterização da rede logística, para validação das abordagens propostas e a busca de soluções para problemas reais.

Optou-se pela utilização de um modelo baseado na rede de distribuição de uma empresa fornecedora de biomassa, que não realiza nenhum tipo de pré-processamento nos resíduos, mas apenas fomenta o mercado. Desta forma, com pequenas adaptações, o mesmo modelo pode ser aplicado em outras configurações de rede logística.

Após a escolha da empresa, realizou-se a coleta dos dados, foi elaborado o modelo

matemático e aplicado a dois cenários, o Cenário 1 considerou os resíduos “in natura” e o Cenário 2, os resíduos densificados. Dentro dos dois cenários propostos foram consideradas duas situações, para ambos: Situação A – representando a situação real do estudo de caso, com todas as limitações de atendimento e situação B – uma situação menos restrita, desconsiderando as limitações de atendimento do estudo de caso.

Ambas as aplicações, A e B, permitiram a análise da rede de abastecimento de biomassa e subsidiaram a avaliação de melhorias para a otimização da rede, tanto em termos de custos como em termos operacionais.

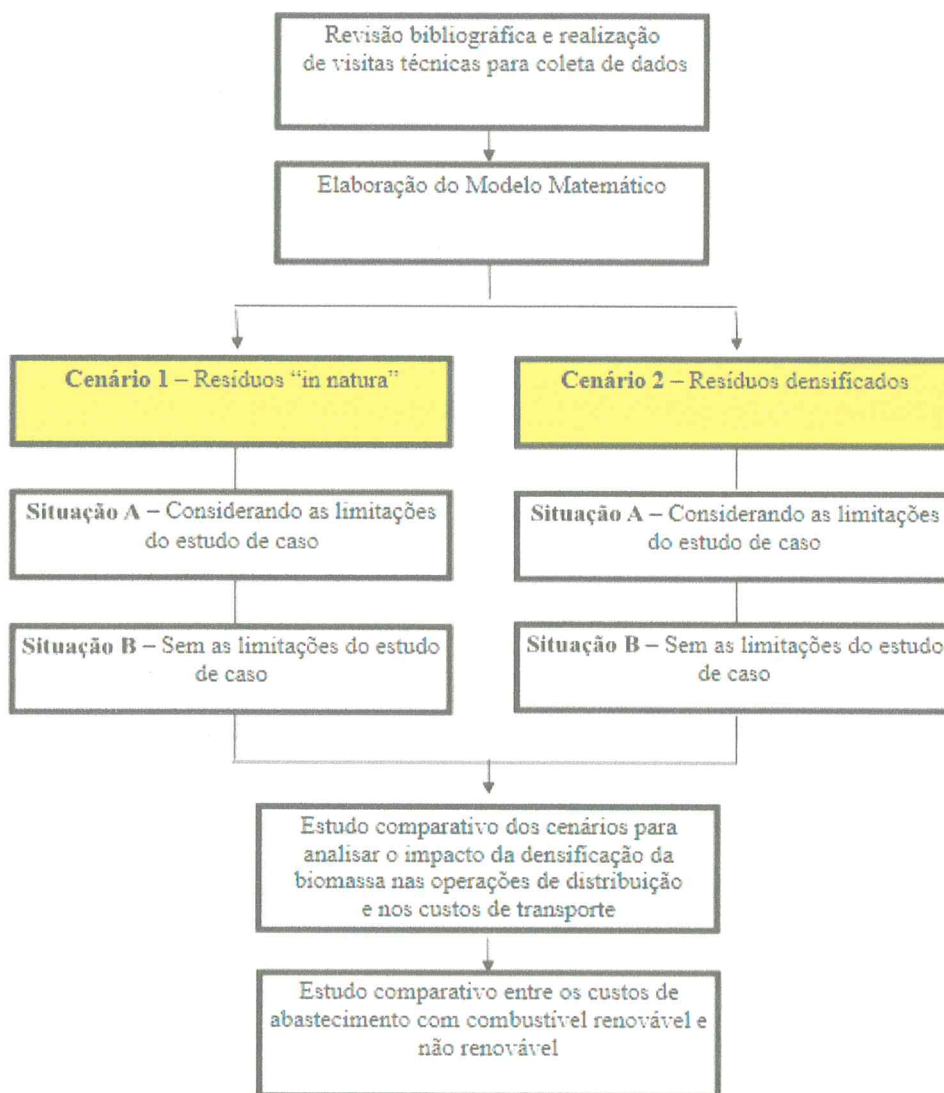
As aplicações no cenário 2, com os resíduos densificados, permitiram avaliar o impacto da densificação dos resíduos nas operações logísticas e conseqüentemente nos custos de transporte desses resíduos.

Por fim, com os resultados das aplicações, foi possível realizar um estudo comparativo entre os cenários e complementarmente comparar os custos de abastecimento com combustível renovável e não-renovável, mais especificamente o gás natural. Esses comparativos possibilitaram responder às questões de pesquisa enunciadas.

Levando em consideração as diversas questões sobre redes de abastecimento de biomassa, pode-se dizer que a melhor decisão indica a opção de menor custo possível para a rede respeitando as limitações existentes no processo produtivo.

A Figura 9 resume as etapas seguidas para realização deste trabalho.

Figura 9 - Resumo da metodologia.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.1 Visitas técnicas

Foram realizadas visitas técnicas a três empresas e consultas por e-mail e telefone a uma quarta empresa. A primeira empresa visitada é do ramo alimentício do Estado de São Paulo, que pretende suprir suas caldeiras com biomassa. Está em processo de transição do

combustível utilizado em suas caldeiras, de fonte não-renovável para biomassa.

A empresa apresentou preocupações em relação ao abastecimento com biomassa: em relação à garantia do fornecimento, das características da biomassa, se estes materiais atenderão às necessidades da caldeira com a mesma qualidade necessária, dúvidas em relação à sazonalidade do material, dentre outras. Em relação ao material densificado, as mesmas dúvidas são apresentadas, cuja operação ainda é incerta e as características do material são desconhecidas.

Durante as visitas à empresa consumidora, identificou-se uma configuração de rede de abastecimento de biomassa, onde a compra é realizada diretamente do fornecedor, ou seja, um relacionamento direto entre cliente e fornecedor sem nenhuma empresa intermediando a compra e venda dos resíduos. Nessa primeira configuração, o cliente realiza pesquisas junto aos fornecedores de biomassa e firma seu contrato de fornecimento com um ou mais fornecedores de acordo com sua necessidade.

Os materiais que estavam sendo considerados para o abastecimento eram resíduos derivados de papel e celulose, resíduos industriais, poda urbana e cavacos, sendo que os fornecedores desses resíduos estavam localizados entre 30 km e 215 km de distância. No entanto, à época da visita a empresa não havia ainda formalizado contrato de fornecimento.

Na segunda empresa visitada uma nova configuração de rede de abastecimento foi encontrada. As empresas geradoras de resíduos entregam a biomassa diretamente aos clientes do mesmo modo que na primeira configuração, porém existe uma empresa intermediando as negociações.

Essa empresa intermediária foi utilizada para o estudo de caso. Ela iniciou suas atividades em 1994, possui atuação nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste no fomento das fontes e usuários de biomassa, promovendo a comercialização de produtos e serviços. O fluxo de materiais nesse sistema logístico flui no sentido dos fornecedores para as empresas consumidoras de biomassa, enquanto o fluxo de informação flui no sentido do “atravessador”.

Os tipos de biomassa comercializados pela empresa são: resíduos de serrarias, cavacos de resíduos florestais e cavaco de reciclagem, sendo que cada fornecedor produz apenas um tipo de resíduo. Tais materiais são utilizados principalmente para combustão direta em caldeiras para geração de calor e/ou vapor.

Os fornecedores possuem transporte próprio, mas podem ser contratados de acordo com a necessidade. Geralmente os resíduos são transportados em composições de transporte

com capacidade volumétrica que variam de 65 a 120 m³. Não existe sazonalidade em relação ao fornecimento desses resíduos e não há restrições quanto à disponibilidade de material pelos fornecedores.

Nessa visita foram confirmadas as dúvidas apresentadas pela empresa anterior, em relação à substituição do combustível fóssil pelo renovável. O entrevistado relatou que essas dúvidas são recorrentes e que o mercado ainda é bastante receoso em relação à utilização de biomassa e que o processo de convencimento das empresas para substituição de caldeiras é difícil e bastante demorado, visto que grandes investimentos são necessários para a aquisição de uma nova caldeira, adequada para o trabalho com biomassa.

Monteiro, Mantha e Rouboa (2012) em seu trabalho de análise da produção e restrições de utilização de peletes no mercado português, relatam que caldeiras movidas à biomassa são maiores em tamanho, têm projetos mais complexos e seu custo de capital é mais alto, variando de 100 a 150 €/kW, enquanto uma caldeira a gás, o custo de capital varia de 15 a 25 €/kW. Os autores ressaltam ainda que, mesmo com benefícios para aquisição de equipamentos de energias renováveis, a discrepância ainda é muito grande.

Contudo, o entrevistado relatou que a substituição pode levar a empresa a uma economia de até 70% nos custos de combustíveis para o abastecimento da caldeira, além de ser um recurso renovável que reduz a emissão de poluentes. Foi relatado ainda que a empresa tem um retorno do investimento na caldeira em um período de 05 anos.

Foi exposto também na segunda visita que o aproveitamento de resíduos ainda encontra barreiras. Uma vez que existe grande diversidade de resíduos disponíveis, as suas características físicas apresentam variações constantes, o que pode influenciar negativamente as negociações desses materiais. Como exemplo citado na entrevista, a baixa densidade do resíduo pode impedir o seu aproveitamento, como ocorre com o capim.

Em relação ao resíduo densificado, foi questionada a utilização no formato de briquetes. O entrevistado relatou que já tentou trabalhar com esse tipo de material, porém, o mesmo não apresentou viabilidade econômica, visto que os custos de processamento tornam o material oneroso, tornando-o menos competitivo em relação ao resíduo *in natura*.

A terceira empresa visitada, fornecedora de biomassa, executa as operações de compra, processamento e venda da biomassa. Resíduos de diferentes origens (resíduos florestais, paletes, móveis descartados, resíduos de construção, dentre outros) são adquiridos ou mesmo recebidos gratuitamente, sendo na sequência, processados, convertidos em cavacos

e distribuídos pela frota própria de veículos.

Um terceiro modelo de configuração de rede de abastecimento de biomassa foi encontrado nesta terceira empresa. Nessa configuração, a empresa fornecedora de resíduos funciona como uma central de distribuição. Diferente das anteriores, ela processa todo resíduo recebido, ou seja, ela recebe, tritura e distribui os resíduos. Tanto a coleta quanto a distribuição dos resíduos são realizados pela frota de veículos da própria empresa.

O recebimento desses resíduos se dá de três maneiras: empresas que precisam realizar a destinação final de seus resíduos e pagam para que essa empresa “central” faça a destinação final; pela compra de resíduos pela empresa para posterior revenda aos seus clientes e finalmente, pela coleta de resíduos em caçambas espalhadas pela cidade.

Ao receber os resíduos, estes passam por uma triagem para separação das impurezas e na sequência são processados por picadores, formando um *mix* de resíduos que são vendidos para os clientes que os utilizam em fornos ou caldeiras industriais.

Esta terceira empresa confirmou a redução dos custos de suprimento em 40%, em média, para as caldeiras abastecidas com biomassa. Assim como a segunda empresa, também houve confirmação desta, da não viabilidade econômica do resíduo densificado, pois os custos de processamento não justificam sua utilização.

Adicionalmente, a empresa relatou a abertura de novas centrais de distribuição de biomassa, ficando assim mais próxima de seus clientes e fornecedores.

Por fim, uma quarta empresa foi procurada através de contatos telefônicos e coleta de dados por e-mail. Esta quarta empresa, atua no mercado há 15 anos, trabalha com o aproveitamento de resíduos de madeira para fabricação de briquetes, remunerando as empresas fornecedoras estimulando assim o recolhimento dos resíduos.

Os briquetes fabricados pela empresa são compostos por resíduos de madeiras em geral, como pó de serra, maravalhas, cavacos ou pedaços de madeira picadas, sem o uso de aglutinantes. Os briquetes são utilizados para queima em fornos, caldeiras, aquecedores, torradores e outros similares. Todos os resíduos de madeiras utilizados para a fabricação dos briquetes são adquiridos em indústrias de esquadrias e beneficiamento da região da empresa.

A quarta empresa foi a responsável pelo fornecimento dos dados de resíduos densificados para a análise do cenário 2.

3.3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE TRANSPORTE DE BIOMASSA

O problema consiste em determinar a quantidade de material que deve ser transportada entre possíveis origens e os destinos para atendimento da demanda, com qual tipo de veículo, de modo a minimizar o custo total do sistema e dimensionar a frota de veículos.

Os resíduos são produzidos por diversas formas, e com isso, possuem diferentes características físicas. Das características físicas dos resíduos, serão consideradas no modelo a densidade e o poder calorífico. A densidade por afetar diretamente a operação de transporte e o poder calorífico por determinar a demanda por biomassa de cada cliente.

As fontes geradoras de resíduos estão dispersas geograficamente, e possuem diferentes capacidades de produção. Estes fornecedores abastecem os clientes que estão em locais determinados, e possuem diferentes demandas por resíduos, definidas de acordo com a necessidade de poder calorífico. O atendimento de cada cliente por determinado fornecedor define a distância para os veículos transportarem a biomassa.

Considerou-se que o transporte dos resíduos é feito por uma frota heterogênea de veículos, disponíveis nos fornecedores. Os veículos operam em viagens cíclicas, partindo do fornecedor, de onde o caminhão sai carregado, para o cliente, onde o material é descarregado e em seguida retorna ao fornecedor para um novo carregamento. Os tempos de carregamento e descarregamento também são considerados no cálculo do ciclo operacional, ou seja, o tempo de ciclo dos veículos é composto por tempo de carregamento, deslocamento carregado, descarregamento e deslocamento vazio, retornando ao fornecedor. Os deslocamentos estão associados a uma velocidade média de ida (veículo carregado) e uma velocidade média de volta (veículo vazio). Assim, o tempo de ciclo dos veículos é um parâmetro calculado previamente e varia de acordo com cada percurso origem-destino. Cada rota fornecedor-cliente, com determinado tipo de veículo, possui um respectivo custo de transporte associado.

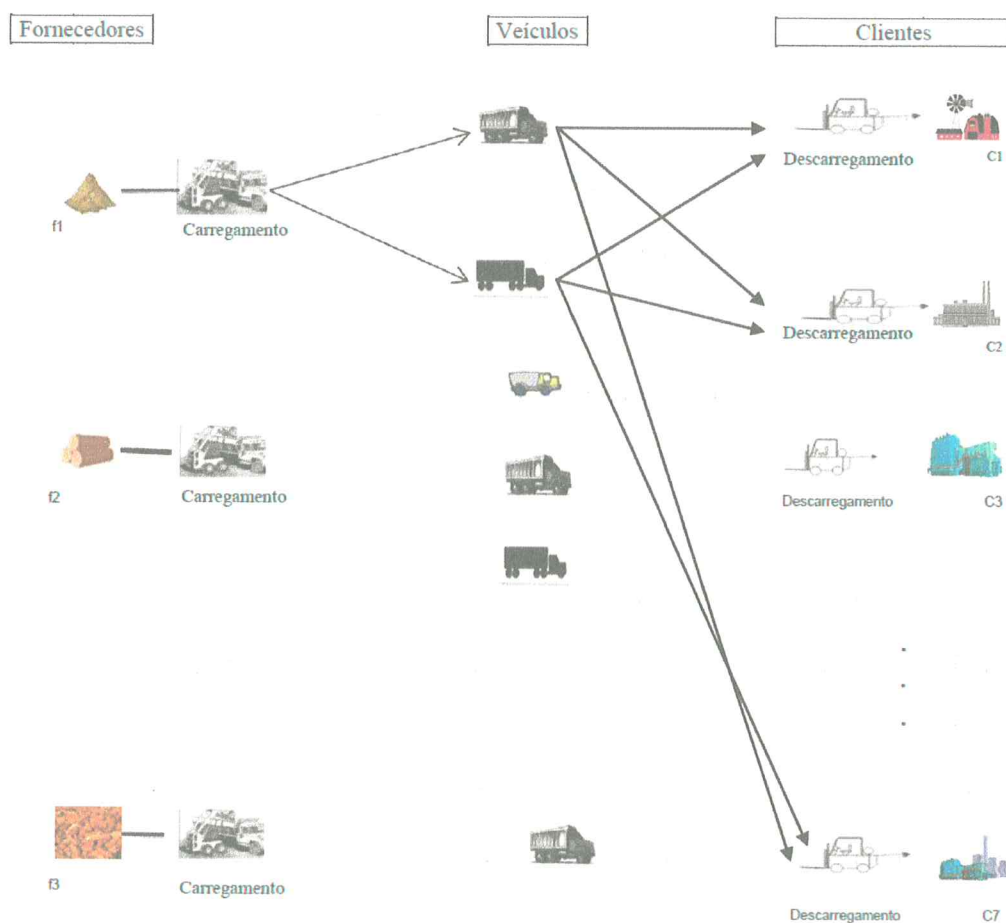
Geralmente os veículos são carregados até atingir o respectivo limite de volume ou peso, que varia de acordo com a densidade de cada resíduo e capacidade de cada veículo. Consequentemente, a carga transportada é um parâmetro calculado previamente, sendo transportada a um único cliente. Considerou-se que a carga transportada por viagem é composta por apenas um tipo de resíduo e os veículos podem realizar várias viagens dentro de

um limite de tempo (dia, mês, ano), condicionada à disponibilidade total de tempo de cada veículo.

Considerando a literatura clássica de pesquisa operacional para gerenciamento da cadeia de suprimentos (Shapiro, 2001; Winston, 1993; Arenales et al., 2007; Taha, 2008), considera-se que a melhor adequação ao caso estudado corresponde ao problema de transporte.

A Figura 10 ilustra a rede de abastecimento de biomassa e esquematisa o problema representado pelo modelo matemático.

Figura 10 - Esquema do problema da rede de abastecimento de biomassa.



Fonte: Elaboração própria.

Os parâmetros, variáveis, objetivos e restrições considerados no modelo de otimização são apresentados na sequência.

Índices:

f fornecedor $\{1, \dots, F\}$

c cliente $\{1, \dots, C\}$

t veículos próprios e contratados $\{1, \dots, T\}$

$t_p =$ veículos próprios e $t_c =$ veículos contratados, sendo $t = t_p \cup t_c$

Onde F corresponde ao número total de fornecedores, T ao total de veículos e C ao número total de clientes.

Parâmetros:

$Custo_f$ custo unitário da tonelada do resíduo de cada fornecedor f ,

d_c demanda em poder calorífico do cliente c ,

k_f capacidade de fornecimento de resíduo pelo fornecedor f ,

pc_f poder calorífico em calorias do resíduo do fornecedor f ,

q_{tf} quantidade de resíduo transportada pelo veículo t do fornecedor f ;

dh_t disponibilidade em hora mês de cada veículo t ,

$frete_{fc}$ custo para transportar do fornecedor f ao cliente c utilizando o veículo t ,

tct_{fc} tempo de ciclo do fornecedor f ao cliente c ,

ra_{fc} disponibilidade do fornecedor f para atender o cliente c , sendo 1 para disponibilidade e 0 caso contrário;

n_{tf} número de veículos t disponível no fornecedor f ;

α_t penalização para quantidade de veículo t utilizada.

Variáveis de Decisão:

x_{tfc} número de vezes que o veículo do tipo t transporta resíduo do fornecedor f ao cliente c ,

y_{tf} total de veículos do tipo t utilizados pelo fornecedor f .

Desta forma, o modelo pode ser formulado como segue:

Minimize:

$$\sum_{f \in F} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \left((x_{tfc} q_{tf} \text{custo}_f) + (x_{tfc} \text{frete}_{tfc}) \right) + \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} \alpha_t y_{tf} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{f \in F} \sum_{t \in T} x_{tfc} q_{tf} p_{cf} r_{afc} \geq d_c, \quad c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} x_{tfc} q_{tf} \leq k_f, \quad f \in F \quad (3)$$

$$\sum_{c \in C} x_{tfc} t_{ctfc} \leq dh_t y_{tf}, \quad f \in F, \quad t \in T \quad (4)$$

$$y_{tf} \leq n_{tf}, \quad t \in T, f \in F \quad (5)$$

$$x_{tfc}, y_{tf} \in Z_{NT}^+ \quad (6)$$

A função objetivo (1) visa minimizar os custos de aquisição e de transporte dos resíduos, que dependem de cada fornecedor. Além disso, a função objetivo inclui uma penalização para a utilização dos veículos contratados o que implica no dimensionamento da frota de veículos utilizada pelos fornecedores. Com essa penalização aplicada apenas aos veículos contratados é possível priorizar a utilização dos veículos da frota. A restrição (2) impõe que a demanda (por poder calorífico) de cada cliente seja atendida, considerando as quantidades recebidas de material de todos os fornecedores. A restrição (3) estipula que a quantidade de resíduo que pode ser transportada não deve ultrapassar a disponibilidade de cada fornecedor. A inequação (4) garante que, se um veículo é utilizado por um determinado fornecedor, a quantidade de viagens não ultrapassa o limite de horas mensais deste veículo. A

restrição (5) garante que o número de veículos utilizados pelos fornecedores não seja maior que a frota disponível. Por fim, a restrição (6) indica a condição de integralidade das variáveis.

A restrição (4) foi baseada no modelo matemático de Albareda-Sambola, Fernández e Laporte (2009), onde a variável utilizada no referido modelo é binária e a frota de veículos considerada é homogênea. Neste trabalho utilizou-se uma variável inteira em virtude da utilização de uma frota heterogênea, com isto é possível dimensionar a frota de veículos utilizada pelos fornecedores. Isso é aplicável, considerando que a frota de veículos pode ser terceirizada de acordo com a necessidade de cada fornecedor.

3.3.1 Dados de entrada para o modelo matemático

Os dados de entrada para o modelo matemático foram coletados da segunda empresa visitada e os dados de materiais densificados foram coletados da quarta empresa. Foi considerada a rede de suprimentos mais representativa da empresa, o que corresponde a 80% da biomassa movimentada.

Na Tabela 2, constam os tipos de resíduos, custo de aquisição, densidade e poder calorífico de cada material. Ressalta-se que cada fornecedor opera com apenas um tipo de material.

Tabela 2 - Custo de aquisição, densidade e poder calorífico de cada resíduo.

Parâmetros	Tipo de material		
	Serraria (Fornecedor 1- f_1)	Reflorestamento (Fornecedor 2- f_2)	Reciclado (Fornecedor 3- f_3)
Custo de aquisição (R\$/tonelada) ($Custo_f$)	80,00	90,00	100,00
Densidade (kg/m ³)	400	300	250
Poder Calorífico (kcal/kg) (pc_f)	2.200	2.800	3.200

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

Com relação ao valor do poder calorífico dos resíduos considerados para a modelagem, percebe-se que, exceto o resíduo do fornecedor 3 (reciclado), os valores dos demais, estão abaixo dos encontrados na literatura. Essas variações ocorrem em virtude do teor de umidade de cada material.

Na Tabela 3, são encontradas as distâncias entre os principais clientes e fornecedores. Os clientes e fornecedores foram considerados como números, para manter sigilo das informações e suas respectivas localizações.

Tabela 3 - Distância em km entre clientes e fornecedores.

Clientes (c)	Distância entre clientes e fornecedores (km)		
	Fornecedor 1 (serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)
Cliente 1	222	109	368
Cliente 2	175	276	440
Cliente 3	351	108	386
Cliente 4	320	223	266
Cliente 5	213	213	251
Cliente 6	302	302	248
Cliente 7	316	162	135

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

A capacidade mensal de entrega de cada fornecedor é ilustrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Capacidade mensal (k_f) de resíduos dos fornecedores em toneladas.

Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 3
30.000 (t)	15.000 (t)	4.000 (t)

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

A demanda mensal de cada cliente, pode ser visualizada na Tabela 5.

Tabela 5 - Demanda de cada cliente em toneladas.

Cliente	Demanda
Cliente 1	10.000
Cliente 2	5.000
Cliente 3	3.000
Cliente 4	1.500
Cliente 5	5.000
Cliente 6	2.500
Cliente 7	2.000

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

Com relação ao tempo de carregamento dos resíduos nos fornecedores e descarregamento dos resíduos nos clientes, segundo informações da empresa, o tempo de carregamento de um caminhão varia de 40 a 120 minutos e o tempo de descarregamento leva de 15 a 45 minutos. O armazenamento desses resíduos ocorre em local aberto (pátios).

Para o transporte dos resíduos, geralmente são utilizadas composições de transporte com capacidade volumétrica que variam de 65 a 120m³, conforme pode ser visualizado na

Tabela 6. Geralmente as empresas fornecedoras possuem seu próprio transporte, mas, se necessário, são contratadas empresas terceirizadas para a prestação de serviço. Assim, o transporte não é um recurso limitante do sistema.

Tabela 6 - Tipos de veículos e respectivas capacidades.

Tipos de veículos (t)	Capacidade volumétrica (m³)	Capacidade máxima permitida (t)
Fundo Móvel	105	27
Basculante	65	24
Gaiolão	90	27
Bi-trem	120	32
Rollon Bi trem	80	25

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

A capacidade máxima permitida refere-se à carga líquida possível de se colocar em cada veículo, respeitando a legislação de trânsito.

Ainda em relação aos veículos, os fornecedores não possuem frota padronizada. Cada fornecedor possui diferentes tipos de caminhões, em diferentes quantidades, conforme pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7 - Quantidade de veículos (n_{ij}) disponível em cada fornecedor.

Tipos de caminhões (t)	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 3
Fundo Móvel	6		
Basculante	5	6	
Gaiolão		6	
Bi trem		4	
Roll on Bi trem			8

Fonte: Empresa do estudo de caso.

Para os veículos contratados foram considerados os mesmos tipos de caminhões e as mesmas capacidades e com relação às quantidades, foi considerada um valor alto, pois a contratação pode ser ilimitada.

Adotou-se como premissa que o caminhão sempre realiza viagens cíclicas de ida e volta, entre o fornecedor e o cliente, saindo carregado do local de disponibilização do resíduo, descarregando no cliente e retornando vazio ao fornecedor. No entanto, nem todos os fornecedores atendem a todos os clientes. A Tabela 8 identifica qual fornecedor atende a cada cliente.

Tabela 8 - Relação de atendimento entre fornecedor x cliente (ra_{fc}).

Cliente	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 3
Cliente 1	X		
Cliente 2	X		
Cliente 3		X	
Cliente 4		X	
Cliente 5	X		
Cliente 6		X	
Cliente 7			X

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

Com relação aos custos de frete para transporte de resíduos na rede de abastecimento considerada no estudo, foi utilizada tabela técnica. Os dados referem-se ao mês de junho de 2014. Os cálculos utilizados são baseados na metodologia de Lima (2009), onde os custos são divididos em fixos e variáveis. Foram considerados itens de custos fixos a depreciação, remuneração do capital, pessoal (motorista), custos administrativos, seguro do veículo, IPVA e seguro obrigatório, e como custos variáveis, pneus, combustível, lubrificante, lavagem e manutenção. Os custos fixos são aplicados ao tempo de ciclo de cada viagem e os custos variáveis às distâncias percorridas.

Considerando a metodologia utilizada, na Tabela 9 é possível visualizar os custos fixos e custos variáveis que foram adotados para cada tipo de veículo. O custo de pedágio não foi considerado no cálculo em virtude de não ser proporcional à rota.

Tabela 9 - Custos fixos e variáveis para cada tipo de veículo.

	Fundo Móvel	Bascalante	Gaiolão	Bi trem	Rollon bi trem
Custo fixo (R\$/hora)	60,79	49,82	54,75	63,95	55,98
Custo Variável (R\$/km)	2,6516	2,2633	2,5827	3,2136	2,5967

Fonte: Elaboração própria.

3.4 APLICAÇÕES COM O MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático foi implementado na linguagem de modelagem algébrica GAMS versão 24.2.1, conforme pode ser visualizado no apêndice A. São apresentados nesta seção, os cenários aos quais o modelo matemático foi implementado. Inicialmente foi implementado o cenário 1, considerando os resíduos *in natura* e posteriormente o cenário 2 considerando os resíduos densificados, no formato de briquetes.

3.4.1 Cenário 1 - Resíduos *in natura*

No cenário 1, com resíduos *in natura*, o modelo foi aplicado primeiramente na situação A, que corresponde ao estudo do caso real com todas as restrições existentes na realidade e na sequência, aplicado à situação B que corresponde ao estudo de caso sem as restrições de atendimento.

A situação A reflete as condições reais da rede de abastecimento de biomassa de referência, utilizada como base para todas as comparações feitas. Em ambas as situações, A e B, os fornecedores trabalham apenas com um tipo de resíduo, com frota própria de veículos e transporte contratado somente se necessário.

Foram considerados valores médios para os tempos de carregamento e descarregamento e velocidade média de ida (veículo carregado) e velocidade média de volta (veículo vazio) os valores de 40 e 60 km/h respectivamente. Para a disponibilidade mensal de cada veículo foram consideradas 220 horas (dh_i).

Levando em consideração os tempos de carregamento e descarregamento, a velocidade média dos veículos e as distâncias entre clientes e fornecedores já mencionados anteriormente na Tabela 3, foram calculados os tempos de ciclo de cada viagem conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Tempo de ciclo de cada viagem entre cliente e fornecedor.

Clientes (c)	Tempo de ciclo (tct_c) para cada viagem entre clientes e fornecedores (h)		
	Fornecedor 1 (serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)
Cliente 1	11,09	6,38	17,17
Cliente 2	9,13	13,34	20,17
Cliente 3	16,47	6,34	17,92
Cliente 4	15,17	11,13	12,92
Cliente 5	10,72	10,72	12,30
Cliente 6	14,42	14,42	12,17
Cliente 7	15,01	8,59	7,47

Fonte: Dados da empresa do estudo de caso.

Com base no tempo de ciclo de cada viagem, na distância entre clientes e fornecedores e nos custos fixos e variáveis de transporte, foram calculados o valor de frete para cada viagem conforme a Tabela 11. Os custos expressam a soma total de custos fixos e custos variáveis para cada viagem; sendo que os custos fixos são multiplicados pelo tempo de ciclo de cada viagem e os custos variáveis são multiplicados pela distância de cada par fornecedor – cliente.

Tabela 11 - Custos de transporte (*frete_{ff}*).

Percurso (fornecedor- cliente)	Custo por Tipo de Caminhão (R\$/veículo)				
	Fundo Móvel	Basculante	Gaiolão	Bi trem	Rollon bi trem
1 – 1	1.851,49	1.557,39	1.753,89	2.136,05	1.773,72
1 – 2	1.483,19	1.247,08	1.403,90	1.708,74	1.420,01
1 – 3	2.862,35	2.409,09	2.714,51	3.308,90	2.744,55
1 – 4	2.619,43	2.204,42	2.483,66	3.027,05	2.511,25
1 – 5	1.780,96	1.497,97	1.686,87	2.054,23	1.705,99
1 – 6	2.478,38	2.085,58	2.349,63	2.863,40	2.375,79
1 – 7	2.588,09	2.178,01	2.453,88	2.990,68	2.481,15
2 – 1	966,00	811,32	912,42	1.108,68	923,31
2 – 2	2.274,64	1.913,92	2.156,01	2.627,01	2.180,12
2 – 3	958,16	804,72	904,98	1.099,59	915,78
2 – 4	1.859,32	1.563,99	1.761,34	2.145,15	1.781,25
2 – 5	1.780,96	1.497,97	1.686,87	2.054,23	1.705,99
2 – 6	2.478,38	2.085,58	2.349,63	2.863,40	2.375,79
2 – 7	1.381,32	1.161,25	1.307,10	1.590,55	1.322,18
3 – 1	2.995,57	2.521,33	2.841,10	3.463,46	2.872,49
3 – 2	3.559,77	2.996,70	3.377,26	4.118,07	3.414,35
3 – 3	3.136,62	2.640,18	2.975,14	3.627,11	3.007,95
3 – 4	2.196,28	1.847,89	2.081,55	2.536,09	2.104,86
3 – 5	2.078,73	1.748,86	1.969,85	2.399,72	1.991,97
3 – 6	2.055,23	1.729,05	1.947,51	2.372,44	1.969,39
3 – 7	1.169,74	982,98	1.106,04	1.345,07	1.118,98

Nota: Onde se lê 1 – 1: considerar do fornecedor 1 para o cliente 1.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme já mencionado anteriormente, as viagens são realizadas com a frota própria de veículos e se necessário podem ser contratados veículos adicionais. Para garantir a utilização de toda a frota antes da contratação de veículos de terceiros, foi utilizado um valor de R\$ 1.000.000 para penalizar cada veículo contratado (α_t).

Com relação à quantidade transportada em cada veículo, foi considerada a densidade de cada resíduo, a capacidade volumétrica e o peso máximo permitido em cada tipo de veículo. Na Tabela 12 são apresentadas as quantidades transportadas de resíduos em cada tipo de veículo. Para o modelo matemático serão utilizadas as quantidades que respeitam o peso máximo permitido de cada veículo, ou seja, para todos os valores que ultrapassaram o peso máximo permitido, esse valor máximo será o considerado para o modelo matemático.

Tabela 12 - Quantidade transportada em cada tipo de veículo (q_{ij}).

Tipos de veículos	Peso limitado à capacidade volumétrica (toneladas)			Peso máximo permitido (toneladas)
	Serraria	Reflorestamento	Reciclado	
Fundo Móvel	42	31,50	26,25	27
Basculante	26	19,50	16,25	24
Gaiolão	36	27	22,50	27
Bi trem	48	36	30	32
Rollon bi trem	32	24	20	25

Fonte: Elaboração própria.

É possível visualizar na Tabela 12, na coluna “peso limitado à capacidade volumétrica” que todos os valores acima do “peso máximo permitido” as cargas são limitadas pelo peso e para os valores inferiores o limitante é o volume.

Seguindo as orientações de Kimmerer e Ventures (2012) para aquisição de biomassa, a demanda será considerada em poder calorífico e a conversão foi realizada multiplicando a demanda em toneladas (Tabela 5) pelo poder calorífico do resíduo (Tabela 2) que o cliente utiliza (Tabela 8). Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Demanda do cliente em poder calorífico (d_c).

Cliente	Demanda em Poder calorífico (kcal/mês)
Cliente 1	22000 x 10 ⁶
Cliente 2	11000 x 10 ⁶
Cliente 3	8400 x 10 ⁶
Cliente 4	4200 x 10 ⁶
Cliente 5	11000 x 10 ⁶
Cliente 6	7000 x 10 ⁶
Cliente 7	6400 x 10 ⁶

Fonte: Elaboração própria.

Na situação B, todos os parâmetros foram mantidos, exceto a restrição de atendimento. Conforme já mencionado, esta implementação desconsidera as restrições de atendimento, ou seja, foi considerado que todos os fornecedores podem atender a todos os clientes, o que visa proporcionar uma maior flexibilidade para o atendimento dos clientes.

3.4.2 Cenário 2 - Resíduos densificados

O cenário 2, refere-se à aplicações com os resíduos densificados. Assim como no cenário 1, ele também contempla a aplicação do modelo matemático na situação A e na situação B, que correspondem respectivamente, à rede de abastecimento do estudo de caso com as restrições de atendimento e sem as restrições de atendimento.

Para o estudo deste cenário, foram utilizados os dados fornecidos pela empresa que trabalha com briquetes, conforme segue:

- Material: Briquete de resíduos de madeira(f);
- Densidade: 1000 kg/m³;
- Poder Calorífico: 4800 kcal (pc_f);
- Preço: 350,00/tonelada ($custo_f$).

As distâncias entre clientes e fornecedores, suas respectivas demandas e capacidade de fornecimento foram mantidas nas mesmas condições do Cenário 1.

Em relação ao transporte, foi informado pela empresa, que os briquetes podem ser transportados com veículos que variam de 15 a 30 toneladas. Com base nessa informação foi incluído na tabela de tipos de veículos, um Truck com capacidade líquida de 15 toneladas, utilizando a mesma metodologia aplicada aos demais para o cálculo dos custos fixos e variáveis. Segue na Tabela 14 as especificações do veículo incluído.

Tabela 14 - Veículo para transporte de briquetes.

	Truck (t)
Peso máximo permitido (toneladas)	15
Custo Fixo	40,08
Custo Variável	1,5861

Fonte: Adaptado Esalq, 2014.

Com base nos custos para o novo tipo de veículo, foram calculados os custos de frete, conforme segue na Tabela 15, juntamente com os demais tipos de veículos considerados nas aplicações anteriores.

Tabela 15 - Custo de transporte para cenário 2 ($frete_{fc}$).

Percurso (fornecedor- Cliente)	Custo por Tipo de Caminhão (R\$/veículo)					
	Fundo Móvel	Basculante	Gaiolão	Bi trem	Rollon bi trem	Truck
1 – 1	1.851,49	1.557,39	1.753,89	2.136,05	1.773,72	1.148,66
1 – 2	1.483,19	1.247,08	1.403,90	1.708,74	1.420,01	921,08
1 – 3	2.862,35	2.409,09	2.714,51	3.308,90	2.744,55	1.773,27
1 – 4	2.619,43	2.204,42	2.483,66	3.027,05	2.511,25	1.623,17
1 – 5	1.780,96	1.497,97	1.686,87	2.054,23	1.705,99	1.105,08
1 – 6	2.478,38	2.085,58	2.349,63	2.863,40	2.375,79	1.536,02
1 – 7	2.588,09	2.178,01	2.453,88	2.990,68	2.481,15	1.603,80
2 – 1	966,00	811,32	912,42	1.108,68	923,31	601,51
2 – 2	2.274,64	1.913,92	2.156,01	2.627,01	2.180,12	1.410,12
2 – 3	958,16	804,72	904,98	1.099,59	915,78	596,67
2 – 4	1.859,32	1.563,99	1.761,34	2.145,15	1.781,25	1.153,50
2 – 5	1.780,96	1.497,97	1.686,87	2.054,23	1.705,99	1.105,08
2 – 6	2.478,38	2.085,58	2.349,63	2.863,40	2.375,79	1.536,02
2 – 7	1.381,32	1.161,25	1.307,10	1.590,55	1.322,18	858,14
3 – 1	2.995,57	2.521,33	2.841,10	3.463,46	2.872,49	1.855,59
3 – 2	3.559,77	2.996,70	3.377,26	4.118,07	3.414,35	2.204,21
3 – 3	3.136,62	2.640,18	2.975,14	3.627,11	3.007,95	1.942,74
3 – 4	2.196,28	1.847,89	2.081,55	2.536,09	2.104,86	1.361,70
3 – 5	2.078,73	1.748,86	1.969,85	2.399,72	1.991,97	1.289,07
3 – 6	2.055,23	1.729,05	1.947,51	2.372,44	1.969,39	1.274,55
3 – 7	1.169,74	982,98	1.106,04	1.345,07	1.118,98	727,41

Fonte: Adaptado Esalq 2014.

Em relação à disponibilidade de horas de cada veículo, foi mantida a mesma aplicada no cenário 1, bem como os tempos de carregamento, descarregamento e velocidade média de ida e volta, assim, os tempos de ciclos entre clientes e fornecedores foram mantidos sem alterações.

Considerando que no cenário 2, o material utilizado possui outra densidade, as

quantidades transportadas foram calculadas novamente conforme apresenta a Tabela 16.

Tabela 16 – Quantidade transportada em cada tipo de veículo no cenário 2 (q_{ij}).

Tipos de veículos	Peso limitado à capacidade volumétrica	Peso máximo permitido
	(toneladas)	(toneladas)
Fundo Móvel	105	27
Basculante	65	24
Gaiolão	90	27
Bi trem	120	32
Rollon bi trem	80	25
Truck	18	15

Fonte: Elaboração própria.

É possível visualizar na Tabela 16 que os veículos possuem alta capacidade volumétrica, porém, em virtude da alta densidade dos briquetes, todos os veículos são limitados pelo peso máximo permitido pela legislação de trânsito.

Ainda com relação aos veículos, neste cenário não foi aplicada a restrição do número de veículos utilizados, visto que, numa situação real, para trabalhar com material densificado, toda a frota da empresa seria repensada. Quanto à penalização, ela foi mantida para a quantificação da frota utilizada.

Assim como no cenário 1, este também contemplou a implementação na situação B, sem as restrições de atendimento. Todos os parâmetros aplicados na situação A foram mantidos sem alterações, exceto as restrições de atendimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as implementações do modelo matemático. Foram realizadas as implementações do cenário 1 considerando os resíduos *in natura*, nas situações A e B que correspondem ao caso real com limitações de atendimento e caso real sem limitações de atendimento e do cenário 2, referente aos resíduos densificados que também foi implementado em ambas as situações, A e B.

4.1 CENÁRIO 1 COM RESÍDUOS *IN NATURA*

A implementação da situação A, foi aplicada exatamente à situação apresentada pela empresa do estudo de caso, com as restrições de atendimento entre clientes e fornecedores. Esta situação é bastante restrita, no entanto, os resultados gerados são relevantes para serem comparados com os demais cenários.

Na situação B, todos os parâmetros foram mantidos, exceto as restrições de atendimento, ou seja, todos os fornecedores podem atender a todos os clientes, oferecendo uma maior flexibilidade para o abastecimento da rede.

Em ambas as situações, as demandas dos clientes foram atendidas e as capacidades dos fornecedores foram respeitadas. O custo total mensal para abastecimento da rede foi de R\$ 4.223.226 na situação A e de R\$ 3.681.141 na situação B, que apresentou um *gap* de R\$ 785,83 em relação à solução ótima. A situação B, por garantir uma maior flexibilidade para o atendimento, garante uma redução de 12,84% no custo total de abastecimento. Na Tabela 17 são apresentadas as quantidades de resíduos utilizadas de cada fornecedor para abastecer os clientes e o percentual de utilização do total da capacidade de cada fornecedor.

Tabela 17 - Quantidade de resíduo utilizada de cada fornecedor no cenário 1.

Fornecedor	Situação A		Situação B	
	Quantidade em toneladas	% de utilização	Quantidade em toneladas	% de utilização
1 – Serraria	20.000,0	66,7	7.181	23,9
2 – Reflorestamento	7.000,5	46,7	14.792	98,6
3 – Reciclado	2.000,0	50,0	4.000	100,0

Autor: Elaboração própria.

É possível visualizar na Tabela 17 que, com a retirada das restrições de atendimento, as quantidades utilizadas de cada fornecedor são alteradas. Com a flexibilização de atendimento dos clientes, esses passam a ser atendidos por outros fornecedores, gerando um menor custo de abastecimento da rede. A Tabela 18 apresenta as quantidades de resíduos fornecidas a cada cliente para facilitar a visualização das alterações de atendimento.

Tabela 18 - Quantidade de resíduos fornecida para cada cliente no cenário 1.

	Situação A			Situação B		
	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)
Cliente 1	10.000				7.858	
Cliente 2	5.000			5.000		
Cliente 3		3.000,5			3.001,5	
Cliente 4		1.500			1.214,5	250
Cliente 5	5.000			2.181	2.158	50
Cliente 6		2.500				2.190
Cliente 7			2.000		560	1.510

Autor: Elaboração própria.

As quantidades apresentadas nos resultados da situação A revelam que o modelo matemático atende ao que tem sido praticado na realidade, pois nessa situação o modelo praticamente só faz a designação da frota. Já na situação B, com a garantia de maior flexibilidade, o resultado apresentado pelo modelo matemático indica um atendimento diferenciado. Por exemplo, para o cliente 1 que é atendido pelo fornecedor 1 na situação A, a melhor indicação é ser atendido pelo fornecedor 2 na situação B. Alterações da mesma natureza ocorrem no suprimento dos clientes 4, 5 e 7.

O atendimento já praticado pelo fornecedor 1 ao cliente 2, os atendimentos do fornecedor 2 aos clientes 3 e 4, e o atendimento do cliente 7 pelo fornecedor 3, pode se dizer que representam a situação mais indicada de acordo com o resultado da situação B.

É possível visualizar ainda, na Tabela 18, que as quantidades de resíduos utilizadas para o abastecimento da rede na situação B é menor. Essas alterações nas quantidades acontecem em virtude da variação do poder calorífico de cada material, ou seja, se o poder calorífico do resíduo é maior, haverá menor necessidade de resíduo.

Os percentuais de utilização de cada resíduo, apresentados na situação B da Tabela 17, indicam que as diferenças dos preços dos resíduos não influenciaram nas escolhas, pois os dois resíduos de custo mais elevado foram preferidos. Essas escolhas são justificadas pelo balanceamento da soma dos custos de aquisição e de frete, das capacidades dos tipos de veículos e da disponibilidade de horas, com isso o modelo optou pela melhor combinação desses fatores.

Ainda com relação aos custos totais para atendimento da rede, o custo de matéria-prima na situação A, representa um percentual de 57,5% e o custo de transporte 42,5%. Já na situação B, o custo de matéria-prima representa um percentual de 62,6% e o custo de transporte um percentual de 37,4%, os valores encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Custos para atendimento da rede no cenário I.

	Situação A	Situação B
Custo de matéria-prima (R\$)	2.430.045	2.305.760
Custo do transporte (R\$)	1.793.181	1.375.381
Custo Total (R\$)	4.223.226	3.681.141

Autor: Elaboração própria.

Comparando os custos da situação A com a situação B é possível verificar que a flexibilização do atendimento dos clientes proporciona uma redução nos custos de matéria-prima de 5,1% e uma redução de 23,3% nos custos de transporte. Apesar de o modelo matemático indicar os fornecedores com maiores preços de resíduos, o balanceamento dos custos envolve o poder calorífico de cada material. Isso faz com que a quantidade de resíduos necessária para o abastecimento da rede seja reduzida. A situação B utiliza uma quantidade de resíduo 10,4% menor que a situação A, conforme pode ser visto nas Tabela 17 e Tabela 18.

Na Tabela 20 é possível verificar o fluxo indicado para o atendimento da rede de abastecimento de biomassa. É possível visualizar qual fornecedor atendeu cada cliente e quantas viagens foram realizadas para o atendimento.

Tabela 20 - Quantidade de viagens realizadas para atendimento da rede no cenário 1.

	Situação A			Situação B		
	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)
Cliente 1	363				264	
Cliente 2	161			195		
Cliente 3		119			152	
Cliente 4		50			46	9
Cliente 5	164			80	79	2
Cliente 6		90				105
Cliente 7			100		20	75

Autor: Elaboração própria.

Para o atendimento das viagens realizadas, o modelo priorizou a frota de veículos própria e contratação apenas na medida do necessário. Foi utilizado um valor de penalização de R\$ 1.000.000 para cada veículo contratado, forçando assim a utilização da frota própria. Conforme pode ser visto na Tabela 20, foram realizadas 1.047 viagens entre cliente e fornecedores na situação A, e 1.027 viagens na situação B.

Para a realização das 1.047 viagens, o resultado indicou um total de 49 veículos, enquanto na situação B houve a necessidade de 40 veículos para a realização das 1.027 viagens. Na Tabela 21 é possível visualizar a quantidade disponível de veículos em cada fornecedor e as quantidades que foram necessárias para o atendimento da rede.

Tabela 21 - Quantidade de veículos disponíveis e utilizados no abastecimento da rede no cenário 1.

Tipos de veículos	Situação A						Situação B					
	Nº de veículos disponíveis			Nº de veículos utilizados			Nº de veículos disponíveis			Nº de veículos utilizados		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Fundo Móvel	6			6			6			6		
Basculante	5	6		5	2		5	6		5	6	
Gaiolão		6		6	6			6			6	
Bi trem		4		16	4			4		1	7	1
Rollon bi trem			8			4			8			8
Totais de veículos	11	16	8	33	12	4	11	16	8	12	19	9

Autor: Elaboração própria.

É possível notar na Tabela 21, na situação A, que o fornecedor 1 utilizou toda a sua frota de veículos e ainda houve uma necessidade de contratação de 22 veículos adicionais, sendo 6 veículos do tipo gaiolão e 16 veículos tipo bi trem.

Na situação A, nota-se que, exceto o fornecedor 1, que necessita de veículos contratados para atender toda sua demanda, os fornecedores 2 e 3 apresentam frota com ociosidade. Na prática, isso se justifica pelo fato desta atividade não ser a atividade principal da empresa. O aproveitamento dos resíduos é uma atividade secundária e provavelmente esses veículos são utilizados para outras atividades ou abastecimento de outros clientes que não pertencem a esta rede.

Já na situação B, há um maior aproveitamento dos veículos próprios, visto que os fornecedores 2 e 3 atendem um número maior de clientes. Dos 40 veículos utilizados apenas 5 foram contratados. Com relação aos veículos contratados é possível notar que o modelo mais indicado para contratação foi o modelo bi trem com a maior capacidade de carga.

Com os 49 veículos indicados na situação A, foram utilizadas um total de 10.609 horas e percorridos um total de 416.750 quilômetros. O custo total de transporte de R\$ 1.793.181, dividido pelo total de quilômetros rodados apresenta um valor de R\$ 4,30 por km rodado.

Na situação B, os 40 veículos percorreram um total de 331.486 quilômetros e o total de tempo de ciclo dos veículos foi de 8.796 horas. Considerando o mesmo critério da situação A, o custo por quilômetro rodado foi de R\$ 4,15. As vantagens em relação ao transporte apresentadas na situação B, justifica-se pela flexibilidade do atendimento, proporcionado uma redução do total de quilômetros rodados.

Enfim, essa flexibilidade de atendimento na situação B garante, em relação à situação A, uma redução de 23,3% em relação aos custos de transporte, de 18,4% em relação à quantidade de veículos utilizados, de 20,5% em relação ao total de quilômetros rodados e de 17,1% de redução do tempo total de ciclo dos veículos.

4.2 CENÁRIO 2 COM RESÍDUOS DENSIFICADOS

Esta seção apresenta os resultados e discussões do cenário 2. Da mesma maneira que o cenário 1, o cenário 2 apresenta aplicações considerando as situações A e B, respectivamente com as limitações e sem as limitações de atendimento dos clientes.

Este cenário não é aplicado na prática, porém foi implementado para um estudo comparativo entre o que se aplica na realidade e a possibilidade de densificação de resíduos. As implementações possibilitam a avaliação do impacto da densificação dos resíduos nas operações de distribuição e nos custos de transporte.

Em ambas as situações A e B, as demandas dos clientes foram atendidas e as capacidades dos fornecedores foram respeitadas. O custo total mensal para abastecimento da rede na situação A foi de R\$ 5.981.282 enquanto na situação B o custo foi de R\$ 5.819.985. A situação B apresenta uma redução de 2,7% no custo total de abastecimento.

Neste cenário, a diferença nos custos não é muito relevante, visto que o modelo considerou que todos os fornecedores possuem o material densificado com as mesmas características físicas. Mediante esta situação, a diferença de custo apresentada na situação B se dá em virtude da maior flexibilização de atendimento dos clientes, o que resulta em menores distâncias percorridas.

Na Tabela 22, é possível visualizar as quantidades de resíduos utilizadas de cada fornecedor para abastecer os clientes e o percentual de utilização da capacidade de cada fornecedor.

Tabela 22 - Quantidade de resíduo utilizada para abastecimento da rede no cenário 2.

Fornecedor	Situação A		Situação B	
	Quantidade em toneladas	% de utilização	Quantidade em toneladas	% de utilização
1 – Serraria	9.175	30,6	2.304	0,07
2 – Reflorestamento	4.084	27,2	9.472	63,1
3 – Reciclado	1.335	33,3	2.816	70,4

Autor: Elaboração própria.

É possível notar que a indicação de atendimento dos clientes é, preferencialmente, realizada pelos fornecedores 2 e 3. Na Tabela 23 são apresentadas as quantidades de resíduos fornecidas a cada cliente para facilitar a visualização das alterações de atendimento entre as duas situações.

Tabela 23 - Quantidade de resíduos fornecida para cada cliente no cenário 2.

	Situação A			Situação B		
	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)
Cliente 1	4.585				4.584	
Cliente 2	2.296			2.272	24	
Cliente 3		1.750			1.750	
Cliente 4		875			811	64
Cliente 5	2.294			32	2.228	32
Cliente 6		1.459			51	1.408
Cliente 7			1.335		24	1.312

Autor: Elaboração própria.

Conforme já mencionado, em virtude das mesmas características físicas dos materiais, a quantidade total utilizada para abastecer os clientes não se altera. Foram utilizadas 14.594 toneladas na situação A e 14.592 toneladas na situação B; a diferença justifica-se pelos arredondamentos do modelo matemático.

De acordo com a Tabela 23 é possível visualizar que a diferença se dá no modo de atendimento da rede, assim como no cenário 1, na situação B o resultado indica um atendimento diferenciado da situação A.

Com relação aos custos totais para atendimento da rede, o custo de matéria-prima, na

situação A, representa um valor de 85,4% e o transporte 14,6%. Na situação B, o custo de matéria-prima representa um total de 87,7 % e o transporte um total de 12,3%. Os valores encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Custos para atendimento da rede no cenário 2.

	Situação A	Situação B
Custo de matéria-prima (R\$)	5.107.900	5.107.200
Custo do transporte (R\$)	873.382	712.785
Custos totais (R\$)	5.981.282	5.819.985

Autor: Elaboração própria.

Comparando os custos de transporte da situação A com a situação B, é possível verificar, que com a flexibilização do atendimento dos clientes, a situação B apresenta uma redução de 18,39% nos custos de transporte em relação à situação A.

A Tabela 25 traz o fluxo de atendimento indicado para o abastecimento da rede. É possível visualizar, qual fornecedor atendeu cada cliente e quantas viagens foram realizadas para o suprimento das demandas.

Tabela 25 - Quantidade de viagens realizadas para atendimento da rede no cenário 2.

	Situação A			Situação B		
	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)	Fornecedor 1 (Serraria)	Fornecedor 2 (reflorestamento)	Fornecedor 3 (reciclado)
Cliente 1	145				147	
Cliente 2	73			71	1	
Cliente 3		63			58	
Cliente 4		32			26	2
Cliente 5	72			1	72	1
Cliente 6		54			2	44
Cliente 7			52		1	41

Autor: Elaboração própria.

Conforme pode ser visto na Tabela 25, foi realizado um total de 491 viagens entre cliente e fornecedores na situação A, e 467 viagens na situação B.

Para a realização das viagens, o modelo indicou a necessidade de 23 veículos na situação A e 18 veículos na situação B. Na Tabela 26 é possível visualizar os tipos de veículos

que foram utilizados para o atendimento da rede e as respectivas quantidades.

Tabela 26 - Quantidade de veículos utilizados no abastecimento da rede no cenário 2.

Tipos de veículos	Nº de veículos utilizados			Nº de veículos utilizados		
	Situação A			Situação B		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Basculante		1	1		1	
Gaiolão	1	5	1		1	
Bi trem	13	1		3	9	4

Autor: Elaboração própria.

Levando em consideração que o modelo matemático faz um balanceamento, entre os custos de matéria-prima e transporte, os tipos de veículos que apresentaram maior viabilidade para o transporte de materiais densificados foram: basculante, gaiolão e bi trem. Os demais tipos de veículos não foram indicados nos resultados apresentados pelo modelo matemático.

Não foram analisadas neste trabalho, as implicações em trabalhar com os veículos maiores, embora o material densificado garanta uma facilidade de armazenagem e necessite de espaços menores para estocagem.

Ainda com relação ao número de veículos utilizados, os 23 veículos indicados na situação A, percorreram um total de 195.138 quilômetros e utilizaram um total de 4.969 horas. O total de custo de transporte de R\$ 873.382, dividido pelo total de quilômetros rodados apresenta um valor de R\$ 4,47 por km rodado.

Na situação B, os 18 veículos rodaram um total de 148.662 quilômetros e o total de tempo de ciclo dos veículos foi de 3.956 horas. Considerando o mesmo critério da situação A, o custo por quilômetro rodado nesta situação foi de R\$ 4,79. A vantagem da situação B, justifica-se na redução do total de quilômetros rodados, esta situação apresenta uma redução de 23,8% menor que na situação A, ou seja, uma redução de 46.476 quilômetros rodados e 1.013 horas.

4.3 ESTUDO COMPARATIVO DOS CENÁRIOS

A seção 4.3 apresenta um estudo comparativo entre o cenário 1 e o cenário 2, ou seja, um estudo comparativo entre o abastecimento da rede de biomassa com resíduos *in natura* e com resíduos densificados.

Nos dois cenários, as implementações foram realizadas considerando duas situações, A e B, sendo que a B garante uma maior flexibilidade ao modelo matemático. Em ambos os cenários foram utilizados a mesma rede de abastecimento de biomassa.

A Tabela 27 apresenta um resumo dos resultados encontrados em ambos os cenários.

Tabela 27 - Resumo dos resultados dos cenários 1 e 2.

Parâmetros	Cenário 1 (<i>in natura</i>)		Cenário 2 (densificados)	
	Situação A	Situação B	Situação A	Situação B
Custo total (R\$)	4.223.226	3.681.141	5.981.282	5.819.985
Custo total de transporte (R\$)	1.793.181	1.375.381	873.382	712.785
Custo de material (R\$)	2.430.045	2.305.760	5.107.900	5.107.200
Quilometragem (km)	416.750	331.486	195.138	148.662
Custo médio de energia (R\$/kcal)	0,035	0,033	0,073	0,073
Tempo de ciclo total (h)	10.609,44	8.795,59	4.969,08	3.956,41
Valor médio do km rodado (R\$/km rodado)	4,30	4,15	4,47	4,79
% dos custos de transporte no custo total	42,5	37,4	14,6	12,3
Nº de veículos utilizados	49	40	23	18
Viagens realizadas	1.047	1.027	491	467
Qtde. de resíduo utilizada do fornecedor 1 (t)	20.000	7.181	9.175	2.304
Qtde. de resíduo utilizada do fornecedor 2 (t)	7.000,5	14.792	4.084	9.472
Qtde. de resíduo utilizada do fornecedor 3 (t)	2.000	4.000	1.335	2.816

Fonte: Elaboração própria.

Levando em consideração somente os custos totais de abastecimento da rede, apresentados na Tabela 27, é possível verificar que somente a situação B do cenário 1, ou seja, situação com resíduos *in natura* e maior flexibilidade de atendimento, apresenta vantagens em relação ao que tem sido praticado na realidade.

A flexibilidade do atendimento dos clientes proporcionada pela situação B em relação à situação A do cenário 1, proporciona uma redução de R\$ 542.085 no custo total de abastecimento. Apesar de ocorrer uma escolha de resíduos com custos mais altos nesta

situação, a redução é obtida tanto nos custos de transporte (R\$417.800) como nos custos dos materiais (R\$124.285).

Com relação à escolha dos resíduos com custos mais altos, é possível perceber que a decisão de escolha pondera o custo de aquisição dos materiais, o poder calorífico, a densidade e os custos de transporte.

Comparando a situação A do cenário 1 com a situação A do cenário 2, onde todos os limites de atendimento foram mantidos, com alteração apenas do resíduo densificado, é possível verificar que a densificação proporciona um aumento de 41,6% nos custos totais. O aumento dos custos totais ocorre, pois, apesar da redução dos custos de transporte em 51% proporcionado pelo adensamento, houve um aumento de 110% nos custos de aquisição dos materiais, que passa de R\$ 2.430.045 para R\$ 5.107.900. O aumento de 110% nos custos dos resíduos, também é constatado através do comparativo do custo médio de energia (R\$/kcal), é possível perceber que o valor aumenta de R\$ 0,035 para R\$ 0,073, o mesmo ocorre no comparativo da situação A do cenário 1, com a situação B do cenário 2.

Apesar do aumento apresentado nos custos totais em virtude do aumento dos custos de materiais, o adensamento proporciona vantagens na redução do número de viagens, no total de quilometragem rodada e no total de veículos utilizados, o atendimento de toda a rede foi realizado com um número de veículos bastante reduzido.

Com apenas 47% dos veículos utilizados na situação A do cenário 1 e apenas 491 viagens foi possível atender toda a rede na situação A do cenário 2.

O total de quilômetros rodados também apresenta uma redução bastante significativa, de 53,2%, sendo possível rodar 221.612 quilômetros a menos na situação A do cenário 2.

A redução da quantidade de veículos, do número de viagens e da quilometragem percorrida podem também proporcionar outros benefícios para a empresa, como por exemplo, redução da frota própria, redução do número de postos de serviço além de proporcionar redução nos custos com pedágio.

Apesar do custo de pedágio não ter sido considerado nos custos de transporte na modelagem do problema, na prática, a redução do número de viagens reduziria as despesas com pedágio.

Já na comparação da situação A do cenário 1 com a situação B do cenário 2, onde a situação B do cenário 2, corresponde a uma situação com material densificado e sem limites de atendimento, também é possível visualizar um aumento nos custos totais de abastecimento

da rede. Apesar de ser um pouco menor que na situação anterior, houve um aumento de 37,8%.

O preço dos materiais, apesar de apresentar um incremento de 110%, foi compensado pela redução de 60% do custo de transporte e de 60% na quantidade de veículos utilizados para abastecimento de toda a rede, ou seja, com os resíduos densificados é possível abastecer toda a rede com apenas 18 veículos.

Essa flexibilidade de atendimento proporcionada na situação B do cenário 2, além de reduzir os custos de transporte e garantir uma redução ainda maior no número de veículos necessários para o atendimento da rede, garante também um tempo de ciclo bastante reduzido, 3.956,41 horas, e com apenas 467 viagens foi possível abastecer todos os clientes.

O número total de viagens foi reduzido em 55%, de 1047 para 467 viagens. Apesar de nesta situação o custo de transporte por quilômetro rodado apresentar o maior valor, de R\$ 4,79 por km/rodado, contra R\$ 4,30 na situação A do cenário 1, o percentual do custo total de transporte para abastecimento da rede é o menor de todas as situações testadas, representando apenas 12,3% dos custos totais.

As vantagens apresentadas nos valores de transporte com os resíduos densificados, são superadas pelos custos do material na soma dos custos totais, fazendo com que apenas a situação B do cenário 1 apresente um melhor resultado. Através dos valores médios de energia, adquiridos com a divisão do custo total de material pelo total de calorías necessárias para abastecimento da rede, é possível visualizar na Tabela 27 que o menor valor apresentado é com a flexibilização do atendimento e os resíduos *in natura*.

A redução dos custos proporcionada pela flexibilização do atendimento, permite que o modelo selecione materiais com maior poder calorífico, reduzindo assim a quantidade necessária para o abastecimento total da rede. A alteração nas quantidades de resíduos utilizadas também pode ser confirmada na tabela apresentada.

Ainda com relação aos custos de materiais, a situação A do cenário 1, totalizou um custo de R\$ 2.430.045, já a situação B do mesmo cenário apresentou uma redução de R\$ 124.285 enquanto no cenário 2, ambas as situações apresentaram um aumento dos custos de materiais, no valor de R\$ 2.677.155, devido aos custos de materiais densificados.

Ainda levando em consideração os custos de materiais para abastecimento da rede, e um ponto de equilíbrio entre os custos de abastecimento com os resíduos densificados e os resíduos *in natura*, é possível verificar que o processo de densificação não pode ultrapassar

um valor total de R\$ 919.799 quando comparado a situação A de ambos os cenários. Esse valor é encontrado subtraindo, do custo total de abastecimento da rede na situação A (R\$ 4.223.226), o custo de R\$ 2.430.045 referente ao valor da matéria-prima e o custo de R\$ 873.382 equivalente ao transporte do resíduo densificado, ou seja, as despesas com adensamento poderiam chegar até R\$ 919.799. Assim, considerando que são necessárias 14.592 toneladas de resíduos densificados para abastecer a rede, pode-se considerar que o custo da tonelada não poderia ultrapassar o valor aproximado de R\$ 229,57 e o custo da kcal o valor de R\$ 0,048.

Considerando a mesma lógica para analisar a situação A do cenário 1, com a situação B do cenário 2, o processo de densificação pode atingir um valor de até R\$ 1.080.396. Esse valor somado ao total de custos de materiais com resíduos *in natura* totaliza um valor de R\$ 3.510.441 somada com o custo total de transporte de R\$ 712.785 resulta no custo total de abastecimento da rede equivalente à situação praticada, ou seja, R\$ 4.223.226. Portanto, o custo da tonelada do resíduo densificado nesta situação não poderia ultrapassar o valor de R\$ 240,57 e o custo da kcal o valor de R\$ 0,05.

As grandes vantagens apresentadas estão diretamente relacionadas ao transporte dos resíduos, comparando a situação A com a B do cenário 1 o transporte apresenta uma redução de R\$ 417.800, já da situação A do cenário 1, para a situação A do cenário 2 a diferença é de R\$ 919.799 e da situação A do cenário 1 para situação B do cenário 2 a redução é de R\$ 1.080.396, ou seja, com a densificação dos resíduos é possível uma redução de até 60,25% dos custos totais de transporte e uma redução bastante expressiva do número de veículos necessários para abastecimento da rede, de 49 para 18 veículos.

A redução da quantidade de veículos pode ter uma importância menor para uma frota contratada, mas é uma decisão significativa em caso de frota própria.

Com relação às limitações dos veículos utilizados para o transporte de biomassa, foi possível constatar que com os resíduos *in natura*, em algumas situações o limitante do veículo foi o volume, em outras o peso. Já para os resíduos densificados o limitante foi sempre o peso. Apesar de ser limitado pelo peso, a maioria das viagens realizadas, indicadas pelos resultados do modelo matemático, foram realizadas com os veículos maiores. Em nenhuma situação o menor veículo foi utilizado.

4.4 ESTUDO COMPARATIVO COM COMBUSTÍVEL NÃO RENOVÁVEL

Para complementar a análise de viabilidade de utilização de resíduos para abastecimento de caldeiras, é possível verificar na Tabela 28, um comparativo de materiais, considerando aqueles utilizados no modelo matemático, acrescidos da opção de abastecimento com Gás Natural, pois nos dados obtidos junto à empresa do estudo de caso, esta opção de combustível não renovável apresentava o menor custo.

Tabela 28 - Comparativo entre combustível renovável e gás natural.

Cliente	Material	Demanda Cliente (ton.)	Custo Material (R\$)	Número Viagens	Quilometragem Total (km)	Custo transporte (R\$)	Custo Médio de transporte (R\$/km)	Custo Total Abastecimento (R\$)	Diferença Custo (R\$)	Qtde. km	Qtde. Km por viagem
1	Serraria	10.000	800.000	312	138.528	666.448	4,81	1.466.448	470.135	97.722	157
1	Reflorestamento	7.857	707.130	245	108.780	523.332	4,81	1.230.462	706.121	146.774	300
1	Reciclado	6.875	687.500	229	101.676	489.155	4,81	1.176.655	759.928	157.959	345
1	Briquete	4.583	1.604.050	143	63.492	305.455	4,81	1.909.505	27.078	5.628	20
1	Gás Natural	2.175.936*	1.936.583					1.936.583			
2	Serraria	5.000	400.000	156	54.600	266.563	4,88	666.563	301.728	61.803	198
2	Reflorestamento	3.928	353.520	123	43.050	210.175	4,88	563.695	404.597	82.873	337
2	Reciclado	3.437	343.700	115	40.250	196.505	4,88	540.205	428.086	87.685	381
2	Briquete	2.292	802.200	72	25.200	123.029	4,88	925.229	43.062	8.820	61
2	Gás Natural	1.087.968*	968.292					968.292			
3	Serraria	3.818	305.440	119	25.704	130.851	5,09	436.291	356.114	69.954	294
3	Reflorestamento	3.000	270.000	94	20.304	103.361	5,09	373.361	419.044	82.316	438
3	Reciclado	2.625	262.500	87	18.792	95.664	5,09	358.164	434.241	85.301	490
3	Briquete	1.750	612.500	55	11.880	60.477	5,09	672.977	119.428	23.460	213
3	Gás Natural	890.343*	792.405					792.405			
4	Serraria	1.909	152.720	60	26.760	128.709	4,81	281.429	114.773	23.863	199
4	Reflorestamento	1.500	135.000	47	20.962	100.822	4,81	235.822	160.380	33.345	355
4	Reciclado	1.312	131.200	44	19.624	94.387	4,81	225.587	170.616	35.473	403
4	Briquete	875	306.250	27	12.042	57.919	4,81	364.169	32.033	6.660	123
4	Gás Natural	445.171*	396.202					396.202			

Continua

Continuação													
Cliente	Material	Demanda Cliente (ton.)	Custo Material (R\$)	Número Viagens	Quilometragem Total (km)	Custo transporte (R\$)	Custo Médio de transporte (R\$/km)	Custo Total Abastecimento (R\$)	Diferença Custo (R\$)	Qtde. km por viagem	Qtde. Km		
5	Reflorestamento	3.928	353.520	123	52.398	252.670	4,82	606.190	362.101	75.091	305		
5	Reciclado	3.437	343.700	115	48.990	236.236	4,82	579.936	388.355	80.536	350		
5	Briquete	2.292	802.200	72	30.672	147.905	4,82	950.105	18.187	3.772	26		
5	Gás Natural	1.087.968*	968.292					968.292					
6	Serraria	3.181	254.480	99	59.796	283.477	4,74	537.957	122.381	25.815	130		
6	Reflorestamento	2.500	225.000	78	47.112	223.345	4,74	448.345	211.992	44.717	287		
6	Reciclado	2.187	218.700	73	44.092	209.028	4,74	427.728	232.609	49.066	336		
6	Briquete	1.458	510.300	46	27.784	131.716	4,74	642.016	18.321	3.865	42		
6	Gás Natural	741.952*	660.337					660.337					
7	Serraria	2.909	232.720	91	24.570	122.401	4,98	355.121	257.062	51.601	284		
7	Reflorestamento	2.286	205.740	71	19.170	95.500	4,98	301.240	310.943	62.417	440		
7	Reciclado	2.000	200.000	67	18.090	90.120	4,98	290.120	322.063	64.649	482		
7	Briquete	1.333	466.550	42	11.340	56.493	4,98	523.043	89.140	17.893			
7	Gás Natural	687.846*	612.183					612.183					

* Considerar valores em m³. Fonte: Elaboração própria.

Para elaboração do estudo comparativo entre os resíduos, foram considerados os mesmos clientes da rede do estudo de caso e a possibilidade de cada cliente ser atendido com todos os tipos de materiais, as quantidades de materiais foram calculadas levando em

consideração a demanda em poder calorífico de cada cliente. Para a simulação das viagens foi utilizado somente o veículo “bitrem” que apresentou a maior utilização nas aplicações dos cenários. As quantidades necessárias de gás natural e os referidos custos, também foram coletados da empresa do estudo de caso.

O cálculo da diferença de custo, refere-se ao comparativo entre o custo de abastecimento com o combustível renovável e o combustível não-renovável. Essa diferença de custo dividida pelo valor médio do quilômetro indica a quilometragem adicional que seria possível rodar para aquisição do resíduo sem ultrapassar o valor de abastecimento com resíduo não renovável. Já a coluna de quantidade de quilômetro por viagem, traz a quantidade de quilômetros que seria possível estender em cada viagem para a aquisição do material em relação aos custos de abastecimento com Gás Natural.

Ainda levando em consideração os custos totais de abastecimento com os materiais apresentados na Tabela 28, ao contrário da afirmação de Coelho, Velázquez e Zylbersztajn (1996) de que o uso de biomassa não é economicamente viável, é possível visualizar que todas as opções de resíduos renováveis apresentam viabilidade em relação aos custos totais de abastecimento com Gás Natural, pois até mesmo o briquete apresentou vantagens.

As vantagens apresentadas referem-se somente aos custos de abastecimento. Nenhum estudo com relação aos custos de transição de caldeiras de combustível não-renovável para renovável foi realizado.

É possível visualizar também, em relação aos materiais, que o resíduo do fornecedor 3, o cavaco de madeira reciclada, apresentado na tabela como “reciclado”, apresenta-se mais viável para todos os clientes no comparativo realizado, apresentando sempre os melhores resultados. Isso justifica-se pelo seu custo em relação ao poder calorífico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em cumprimento ao objetivo deste trabalho, foi verificado como ocorre a distribuição da biomassa, dos locais de disponibilização dos resíduos até os pontos de consumo. Com a finalidade de avaliar o impacto da densificação nas operações de distribuição e conseqüentemente nos custos de transporte foi utilizado um modelo de transporte para analisar a rede de abastecimento de biomassa em cenários de interesse.

Complementarmente foi realizado um comparativo entre o abastecimento com combustível renovável e não renovável, mais especificamente o Gás Natural, para analisar a possibilidade de expansão geográfica para a utilização dos resíduos.

As aplicações do modelo distinguem-se apenas em relação aos tipos de resíduos e flexibilizam o atendimento dos clientes. A primeira aplicação (cenário 1) corresponde ao estudo do caso real com todas as restrições de atendimento existentes (situação A) e na seqüência a situação B, que corresponde ao estudo de caso sem as restrições de atendimento. O cenário 2 contemplou as mesmas situações, porém com resíduos densificados. A situação A do cenário 1 foi utilizada como referência em todas as comparações realizadas.

Tanto as aplicações do modelo, como as visitas técnicas e as entrevistas semi-estruturadas foram realizadas para responder às questões de pesquisa enunciadas no capítulo 1.

- O suprimento de biomassa para as empresas que demandam esse produto, pode ocorrer de quatro maneiras: contratação direta com os fornecedores de resíduos; contratação através de uma empresa que faz a intermediação dessas negociações; aquisição de resíduos de empresa que trabalha com a coleta e distribuição de resíduos; ou aquisição de empresas que trabalham com a venda do resíduo densificado.
- Com relação à possibilidade de melhoria da logística de suprimento de biomassa, a aplicação do modelo mostrou que a flexibilização do atendimento, se possível, pode contribuir para a melhoria da distribuição de biomassa.
- O aumento da densidade dos resíduos influencia a logística de abastecimento da rede. Há um grande benefício em relação ao transporte, pois é possível uma redução bastante expressiva da frota de veículos e no número de viagens

necessárias para abastecimento da rede. No entanto, os custos totais de abastecimento com resíduo densificado não apresentam vantagens em relação aos resíduos *in natura*, devido ao custo de aquisição do produto.

- Na rede considerada para a comparação entre o resíduo *in natura* e o resíduo densificado não foi possível uma expansão geográfica, pois o custo total de abastecimento da rede não apresentou viabilidade econômica.

Das quatro configurações encontradas para o suprimento da caldeira com biomassa, a primeira opção, relacionamento direto com os fornecedores de resíduos, apresentou dúvidas em relação ao seu abastecimento, uma vez que, no contato direto com o fornecedor não havia garantias, tanto da continuidade de fornecimento como da qualidade do material. Já com a intermediação de uma empresa responsável pelo suprimento há maior segurança em relação à continuidade e menor variação em relação às características dos resíduos.

A flexibilidade do atendimento dos clientes por parte dos fornecedores, verificada pelos resultados da situação B dos dois cenários, possibilita uma redução dos custos totais para o abastecimento da rede, garante a utilização de uma frota menor de veículos e diminui a necessidade de contratação de veículos de terceiros. Estes resultados podem representar novas opções para a rede, dar suporte a decisões e principalmente ajudar com opções de atendimento que geram menores custos.

Com relação aos resíduos densificados e levando em consideração a visão do cliente, o estudo de viabilidade econômica aponta que não há vantagem em trabalhar com os resíduos densificados. Apesar de apresentarem benefícios como o aumento da densidade, melhoria no armazenamento e transporte, aumento da eficiência energética, diminuição de sujeira, os custos dos resíduos densificados apresentam um valor bastante elevado, tornando essa opção inviável para os clientes.

Por outro lado, levando em consideração a visão dos fornecedores, até certo limite de custo de adensamento, conforme apresentado na análise comparativa, a densificação poderia ser uma alternativa viável, visto que, o transporte apresenta vantagens bastante expressivas. De acordo com a literatura os resíduos densificados também apresentam vantagens em relação à armazenagem, porém neste estudo esta operação não foi considerada.

Como sugestão de trabalhos futuros, mediante modificação do modelo elaborado, estudos podem ser conduzidos para contemplar a armazenagem dos resíduos, visto que os estoques de resíduos geram dificuldades na cadeia de abastecimento.

Com relação à expansão geográfica, não foi possível verificar sua viabilidade em relação aos materiais densificados. Porém, verificou-se a possibilidade de expansão dos resíduos renováveis em relação ao gás natural.

Reconhece-se que neste estudo não foram realizados levantamentos em relação aos custos de transição de caldeiras de combustível não-renovável para renovável, as vantagens apresentadas referem-se somente aos custos de abastecimento. Outra sugestão para estudos futuros poderia contemplar a análise dos custos relacionados à substituição de caldeiras, bem como o retorno dos investimentos necessários para trabalhar com combustível renovável.

Levando em consideração as empresas entrevistadas, a viabilidade econômica da utilização da biomassa também foi confirmada e a sazonalidade do material não representa nenhum tipo de problema para a rede de abastecimento considerada.

Apesar das dúvidas encontradas, foi possível perceber que há de fato uma preocupação do setor industrial em diminuir os impactos ambientais e reduzir a emissão de gases na atmosfera, mas isso está atrelado à redução de custos dos insumos para a geração da energia. Seja por motivo econômico ou ambiental, a utilização de biomassa apresenta-se em crescimento.

Levando em consideração as preocupações apresentadas pelas empresas, também como sugestão de trabalhos futuros, pode se pensar na inclusão de novos objetivos no modelo matemático, como por exemplo, a emissão de poluentes e a avaliação do impacto ambiental com a utilização dos resíduos para geração de energia.

Em relação à metodologia utilizada, verifica-se através dos resultados alcançados que ela é compatível com a proposta do trabalho, e com relação à ferramenta utilizada para responder às questões de pesquisa, o modelo de transporte mostrou bons resultados. Foi possível responder todas as questões de pesquisa enunciadas. É possível também utilizar o modelo como suporte à decisão e como ponto de partida para trabalhos futuros. Como desdobramento da presente pesquisa, é possível pesquisar redes de abastecimento de outros tipos de biomassa ou até mesmo utilizar o modelo como suporte para outros problemas similares de suprimento. É possível ainda, a inclusão de fornecedores de resíduos densificados, bem como fornecedores de combustíveis não-renováveis no mesmo modelo matemático.

Através dos resultados do modelo, fica confirmada a existência de ineficiência na distribuição dos resíduos, pois rotas maiores estão sendo realizadas em detrimento das mais

curtas, porém outros fatores internos, que não foram apresentados durante as entrevistas, devido às limitações da empresa, podem justificar essas escolhas.

O melhor resultado foi indicado pela aplicação no modelo matemático na situação B do cenário 1. O modelo identificou a melhor estratégia de abastecimento, indicou os melhores fornecedores para atender aos devidos clientes, os tipos de veículos e a quantidade de materiais.

Os briquetes, apesar de apresentarem uma densidade mais elevada e um poder calorífico maior, os custos de materiais influenciaram negativamente no total dos custos para abastecimento da rede. Estudos futuros também poderiam contemplar os custos de adensamento de resíduos bem como formas de baratear o processo. Novas tecnologias para adensamento do material podem reverter os resultados encontrados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA AMBIENTE E ENERGIA. Uma alternativa para geração limpa. **Revista Eletrônica Ambiente e Energia**, [S.l.], jun. 2012. Disponível em: <<http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2012/06/uma-alternativa-para-geracao-limpa/19712/>>. Acesso em: 07 jun. 2012.
- ALBAREDA-SAMBOLA, M.; FERNÁNDEZ, E.; LAPORTE, G. The capacity and distance constrained plant location problem. **Computers & Operations Research**, New York, n. 36, p. 597-611, 2009.
- ALLEN, J. et al. Logistics management and costs of biomass fuel supply. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Bradford, v. 28, n. 6, p. 463-477, 1998.
- AN, H.; SEARCY, S.W. Economic and energy evaluation of a logistics system based on biomass modules. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 46, p. 190-202, Nov. 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil/Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília, 2008. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 15 jul. 2012.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ARROZ SUL NEGÓCIOS RURAIS. **Arroz: usina de beneficiamento de arroz usa briquetes no Tocantins**. 2012. Disponível em: <<http://arrozsul.tempsite.ws/noticias/arroz---usina-de-beneficiamento-de-arroz-usa-briquetes-no-tocantins.php>>. Acesso em: 27 jul. 2012.
- ARROZ SUL NEGÓCIOS RURAIS. **Resíduos de arroz em casca viram lucrativa biomassa**. 2010. Disponível em: <<http://arrozsul.tempsite.ws/noticias/residuos-de-arroz-em-casca-viram-lucrativa-biomassa.php>>. Acesso em: 27 jul. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013.
- ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. **Conceito e Tecnologias**. Disponível em: <www.cogen.com.br/cog_conceito.asp>. Acesso em: 19 maio 2014.

BALLOU, R.H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2004.

BERGER, R. et al. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 33, n. 1, p. 53-62, 2003. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/viewFile/2277/1902>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

BERGER, R.; ENGLER, J. J. de C. **Minimização do custo de transporte de madeira de eucalipto no estado de São Paulo**. 1976. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr12/cap01.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2012.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operation & Production Management**, Bradford, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BIOMASSA com produtividade. **Referência Florestal**, [S.l.], ano XVI, n. 152. p. 35-46, jun. 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2013**: ano base 2012. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz energética nacional 2030**. 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_energetica_nacional_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf> Acesso em: 22 abr. 2013.

BRINCK, V.; CARVALHO, E. A. **Briquetagem**. Rio de Janeiro, 2004. (Comunicação Técnica elaborada para a 4ª edição do livro de tratamento de minérios (CT2004-190-00). Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-190-00.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2012.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular técnica**, São Paulo, n. 52, p. 1-7, jun. 1979.

CABRITA, I. **Oportunidades e desafios para as bioenergias**: acordos de cooperação internacional em I&D. [S.l.: s.n.], 2010. (Educação e Divulgação Científicas em Portugal: Bioenergias).

CARVALHO, L. S. **Modelagem e simulação**: poderosa ferramenta para a otimização de operações logísticas. 2010. Disponível em <<http://www.sitedalogistica.com.br/news/modelagem%20e%20simula%C3%A7%C3%A3o%20-%20poderosa%20ferramenta%20para%20a%20otimiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20opera%C3%A7%C3%B5es%20logisticas/>>. Acesso em: 15 jun. 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Conceituando Biomassa**. 2011. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/conceituando.htm>>. Acesso em: 05 jun. 2012.

COELHO, L. C. **Tipos de caminhões (tamanhos e capacidades)**. 2010. Disponível em: <www.logisticadescomplicada.com/tipos-de-caminhões-tamanhos-e-capacidades/>. Acesso em: 13 abr. 2014.

COELHO, S. T. et al. Geração de eletricidade em comunidades isoladas da região Amazônica utilizando sistemas nacionais de gaseificação de biomassa *in natura*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2006. p. 881-886.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; KARNIOL, M. R. **Atlas de bioenergia do Brasil**: São Paulo. 2012. (Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO). Disponível em <<http://cenbio.iee.usp.br/download/atlasbiomassa2012.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2013.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. G.; ZYLBERSZTAJN, D. Cogeneration in Brazilian pulp and paper industry from biomass-origin to reduce CO₂ emissions. In: BRIDGEWATER, A. V.; BOOCOOCK, D. G. B. (Ed.). **Developments in thermochemical biomass conversion**. [S.l.]: Springer, 1996. v. 3, p. 1073-1085.

COELHO, S. T.; PALETTA, C. E. M.; FREITAS, M. A. V. **Medidas mitigadoras para redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica**. Brasília: Dupligráfica, 2000.

CORTEZ, C. L. et al. Alternativa sustentável para utilização de resíduos de poda provenientes da manutenção das redes de distribuição de energia elétrica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7., 2008, Fortaleza. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/publicacoes.htm>>. Acesso em: 21 jul. 2012.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **Glossary of terms**. Disponível em: <<http://cscmp.org/resources-research/glossary-terms>>. Acesso em: 16 abr. 2014.

DE ANGELIS, B. L. D. et al. Avaliação das árvores de vias públicas da zona central de Maringá, Estado do Paraná: estimativa de produção de resíduos e destinação final. **Acta Scientiarum – Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 133-140, 2007.

DELIVAND, M. K.; BARZ, M.; GHEEWALA, S. H. Logistics cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. **Energy**, [S.l.], n. 36, p. 1435-1441, 2011.

DESTOUNI, G.; FRANK, H. Renewable energy. **Ambio**, Stockholm, n. 39, p. 18-21, Jul. 2010.

DYKEN, S. V.; BAKKEN, B. H.; SKJELBRED, H. I. Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. **Energy**, [S.l.], v. 35, p. 1338-1350, 2010.

FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. Torrefação de biomassa: características, aplicações e perspectivas. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200003&script=sci_arttext>. Acesso em: 27 jan. 2014.

FOELKEL, C. **As biorrefinarias integradas no setor brasileiro de fabricação de celulose e papel de eucalipto**. Eucalyptus Online Book & Newsletter, [S.l.], Ago. 2012. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/newspt_set12.html>. Acesso em: 22 maio 2013.

FOELKEL, C. Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, [S.l.], Out. 2007. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT07_residuoslenhosos.pdf>. Acesso em: 22 maio 2013.

FORSBERG, G. Biomass energy transport. Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 19, p. 17- 30, 2000.

FRAGMAQ. **Maravalha de madeira**: uma alternative sustentável. 2012. Disponível em <www.agmaq.com.br/blog/biomassa/maravalha-de-madeira/> Acesso em: 09 jun. 2014.

FRANCO, M. P. et al. **Fabricação de briquetes a partir de casca de arroz**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 6., 2011, Curitiba. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p. 40.

FURTADO, T. S. et al. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 795-802, out./dez. 2012.

FURTADO, T.S. et al. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106, maio/jul. 2010.

GALVÃO JUNIOR, F. A. **Otimização dos sistemas de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos**. 2003. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

GENTIL, L.V.B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GIL, A. G. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: Ed. USP, 1998.

GOLDEMBERG, J. The Case for Energy Renewables. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES, 2004, Bonn. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2004. p. 3-10.

GOLDEMBERG, J. COELHO, S. T. Renewable energy – traditional biomass vs. Modern biomass. **Energy Policy**, Surrey, v. 32, n. 6, p. 711-714, Apr. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421502003403>>. Acesso em: 15 jul. 2012.

GOMES, C. F. S.; MAIA, A. C. C. Biomassa como fonte alternativa para o fornecimento de energia. **Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 65-82, jan./abr. 2012.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos em rejeitos de resíduos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009.

GRANADA, E. et al Fuel lignocellulosic briquettes, the design and products study. **Renewable Energy**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 561-573, 2002.

HALL, P.; GIGLER, J. K.; SIMS, R. E. H. Delivery systems of forest arisings for energy production in New Zealand. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 21, p. 391-399, 2001.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

JUNGINGER, M. et al. Opportunities and barriers for international bioenergy trade. **Energy Policy**, Surrey, v. 39, p. 2028-2042, 2011.

KARWANDY, J. **Pellet production from sawmill residue: a Saskatchewan perspective**. [S.l.: s.n.], 2007. (Forintek Canada Corp Report, n. 29).

KIM, J.; REALFF, M. J.; LEE, J. H. Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. **Computers & Chemical Engineering**, New York, v. 35, n. 9, p. 1738-1751, Sep. 2011.

KIMMERER, T.; VENTURES, M. Logistics of biomass preparation and delivery for co-firing with coal. **Power Engineering**, [S.l.], v. 116, n. 4, p. 64-65, Apr. 2012.

LEITE, A. M. P. **Análise dos fatores que afetam o desempenho de veículo e o custo de transporte de madeira no distrito florestal do Vale do Rio Doce/MG**. 1992. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1992.

LIMA, L. M. et al. Avaliação de viabilidade técnica e econômica da utilização de biomassas como fonte energética alternativa em fornos industriais. **Revista de economia e agronegócio**, Viçosa-MG, v. 4, n. 1, 2006. Disponível em <<http://esalqlog.esalq.usp.br/files/biblioteca/arquivo93.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2013.

LIMA, M. P. Custeio do transporte rodoviário de cargas. IN: FIGUEIREDO, K. F.; FLEURY, P. F.; WANKE, P. (Org.). **Gerenciamento de cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos**. São Paulo: Atlas, 2009. p. 257-267.

LIU, Z. et al. Effects of carbonization conditions on properties of bamboo pellets. **Renewable Energy**, Oxford, v. 51, p. 1-6, Mar. 2013.

LOPES, E. da S. et al. Harvesting and wood transport planning with snap III program (scheduling and network analysis program) in a pine plantation in Southeast Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 6, p. 831-836, 2003.

MACEDO, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades de desenvolvimento**. Brasília: CGEE, 2001. 10 p.

MACHADO, C. C. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2000.

MARÍN, E. A. C.; VELÁSQUEZ, H. J. C.; CÁRDENAS, E. L. M. Biocombustibles: búsqueda de alternativas. **Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 118-123, jul./dic. 2011.

MARVIN, W.A. et al. Economic optimization of a lignocellulosic biomass-to-ethanol supply chain. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 67, p. 68-79, Jan. 2012.

MELO E SOUSA, R. A. T. de. **Análise do fluxo de transporte rodoviário de toras curtas de eucalipto para algumas indústrias de celulose e de chapas de composição no estado de São Paulo**. 2000. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

MIGLIORINI, A.J. **Densificação de biomassa florestal**. Piracicaba: [s.n.]: 1980. v.1, n. 2, p. c-1-c-9. (Série Técnica IPEF).

MONTEIRO, E.; MANTHA, V.; ROUBOA, A. Portuguese pellets market: analysis of the production and utilization constrains. **Energy Policy**, Surrey, v. 42, p. 129-135, 2012.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Coord.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 166-194.

MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 363-372, abr./jun. 2011.

NAGEL, J. Determination of an economic energy supply structure based on biomass using a mixed-integer linear optimization model. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 16, p. 91-102, 2000.

NAMULI, R. et al. Optimisation of biomass waste to energy conversion systems for rural grid-connected applications. **Applied Energy**, London, v. 102, p. 1013-1021, 2013.

NUNES, M. F. S. **Cadeias de abastecimento de biomassa**: estudo de caso. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2012.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characteristics and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 27, p. 653-669, 2004.

PROTÁSIO, T. P. et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, out./dez. 2011.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Bioenergia**, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.

PAULA, L. E. R. e et al. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 103-112, abr./jun. 2011.

REIS, B. O. et al. **Produção de briquetes energéticos a partir de caroços de açaí**. 2002. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0080.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2012.

REN21. **Renewables 2012 Global Status Report**. Paris: 2012.

RENTIZELAS, A. A.; TATSIPOULOS, I. P.; TOLIS, A. An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply. **Biomass an Bioenergy**, Oxford, n. 33, p. 223-233, 2009.

RODRIGUES, L. D. et al. Uso de briquetes compostos para produção de energia do estado do Pará. In: ENCONTRO ENERGIA MEIO RURAL, 2002. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v2/129.pdf>>. Acesso em 21 jul. 2012.

RODRIGUEZ, L. C. E.; LIMA, A. B. H. P. M. de. A utilização da programação linear na determinação de uma estratégia ótima de reforma de um talhão florestal. **IPEF**, Piracicaba, n. 31, p. 47-53, dez. 1985.

SALMERON, A. **Pesquisa sobre mecanização florestal para abastecimento industrial de resíduo visando a produção de energia**. Piracicaba: [s.n.], 1980. v. 1, n. 2, p. B.1-B.12 (Série Técnica IPFE).

SANTOS, R. C. dos et al. Potencial de briquetagem de resíduos florestais da região do Seridó, no Rio Grande do Norte. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 285-294, out./dez. 2011.

SHAPIRO, J. F. **Modeling the supply chain**. Duxbury Press, 2001.

SHARMA, B. et al. Scenario optimization modeling approach for design and management of biomass-to-biorefinery supply chain system. **Bioresource technology**, Essex, v. 150, p. 163-171, Dec. 2013.

SILVA, J. E. A. R. da. **Um modelo de simulação discreta para analisar o sistema integrado de colheita de cana-de-açúcar e aproveitamento de biomassa**. 2011. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SILVA, M. L. da et al. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 6, p. 1091-1099, 2010.

SUN, J.; LIN, J.; QIAN, Y. Game-theoretic analysis of competitive agri-biomass supply chain. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 43, p. 174-181, Mar. 2013.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. Arlete Simille Marques (Trad.). São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 33, p. 261-314, 2008. Disponível em:
<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3308.pdf> Acesso em: 23 abr. 2013.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, N. Case research in operations management. **International Journal of Operation & Production Management**, Bradford, v. 22, p. 195-219, 2002.

YAN, J. et al. A future for biomass. **Mechanical Engineering**, New York, v. 119, n. 10, Oct.1997.

YOKOTA, P. **O Complexo problema de energia elétrica no Brasil**. Disponível em:
<<http://www.asiacomentada.com.br/2012/04/o-complexo-problema-da-energia-eltrica-no-brasil>>. Acesso em: 30 jun. 2012.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 3rd. ed. Belmont: Duxbury Press, 1993.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; JOHNSON, M. A. Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production. **Renewable Energy**, Oxford, v. 44, p. 380, 2012.

ZHU, X.; LI, X.; YAO, Q.; CHEN, Y. Challenges and models in supporting logistics system design for dedicated-biomass-based bioenergy industry. **Bioresource Technology**, Essex, v. 102, p. 1344-1351, 2011.

APÊNDICE A

Implementação do Modelo Matemático no GAMS

```

sets
f fornecedores /f1,f2,f3/
t transportes /t1,t2,t3,t4,t5,tc1,tc2,tc3,tc4,tc5/
c clientes /c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7/;

parameter
custo (f) custo do resíduo de cada fornecedor f
/f1 80
f2 90
f3 100/;

parameter
d (c) demanda do cliente c em poder calorífico
/c1 22000000000
c2 11000000000
c3 8400000000
c4 4200000000
c5 11000000000
c6 7000000000
c7 6400000000/;

parameter
k (f) capacidade em ton do fornecedor f do resíduo
/f1 30000
f2 15000
f3 4000/;

parameter
pci(f) poder calorífico do resíduo do fornecedor f
/f1 2200000
f2 2800000
f3 3200000/;

table
q(f,t) quantidade transportada do fornecedor f ao cliente c
      t1  t2  t3  t4  t5  tc1  tc2  tc3  tc4  tc5
f1    27  24  27  32  25  27  24  27  32  25
f2    27  19.5  27  32  24  27  19.5  27  32  24
f3    26.25  16.25  22.5  30  20  26.25  16.25  22.5  30  20;

parameter
alfa (t) penalização
/tc1 1000000
tc2 1000000
tc3 1000000
tc4 1000000
tc5 1000000/;

parameter
dh(t) disponibilidade em horas do veículo t
/t1 220
t2 220
t3 220
t4 220
t5 220

```

```
tc1 220
tc2 220
tc3 220
tc4 220
tc5 220/;
```

```
table
```

```
frete(f,c,t) frete do fornecedor f ao cliente c com veiculo t
```

	t1	t2	t3	t4	t5	tc1	tc2	tc3	tc4	tc5
f1.c1	1851.49	1557.39	1753.89	2136.05	1773.72	1851.49	1557.39	1753.89	2136.05	1773.72
f1.c2	1483.19	1247.08	1403.90	1708.74	1420.01	1483.19	1247.08	1403.90	1708.74	1420.01
f1.c3	2862.35	2409.09	2714.51	3308.90	2744.55	2862.35	2409.09	2714.51	3308.90	2744.55
f1.c4	2619.43	2204.42	2483.66	3027.05	2511.25	2619.43	2204.42	2483.66	3027.05	2511.25
f1.c5	1780.96	1497.97	1686.87	2054.23	1705.99	1780.96	1497.97	1686.87	2054.23	1705.99
f1.c6	2478.38	2085.58	2349.63	2863.40	2375.79	2478.38	2085.58	2349.63	2863.40	2375.79
f1.c7	2588.09	2178.01	2453.88	2990.68	2481.15	2588.09	2178.01	2453.88	2990.68	2481.15
f2.c1	966.00	811.32	912.42	1108.68	923.31	966.00	811.32	912.42	1108.68	923.31
f2.c2	2274.64	1913.92	2156.01	2627.01	2180.12	2274.64	1913.92	2156.01	2627.01	2180.12
f2.c3	958.16	804.72	904.98	1099.59	915.78	958.16	804.72	904.98	1099.59	915.78
f2.c4	1859.32	1563.99	1761.34	2145.15	1781.25	1859.32	1563.99	1761.34	2145.15	1781.25
f2.c5	1780.96	1497.97	1686.87	2054.23	1705.99	1780.96	1497.97	1686.87	2054.23	1705.99
f2.c6	2478.38	2085.58	2349.63	2863.40	2375.79	2478.38	2085.58	2349.63	2863.40	2375.79
f2.c7	1381.32	1161.25	1307.10	1590.55	1322.18	1381.32	1161.25	1307.10	1590.55	1322.18
f3.c1	2995.57	2521.33	2841.10	3463.46	2872.49	2995.57	2521.33	2841.10	3463.46	2872.49
f3.c2	3559.77	2996.70	3377.26	4118.07	3414.35	3559.77	2996.70	3377.26	4118.07	3414.35
f3.c3	3136.62	2640.18	2975.14	3627.11	3007.95	3136.62	2640.18	2975.14	3627.11	3007.95
f3.c4	2196.28	1847.89	2081.55	2536.09	2104.86	2196.28	1847.89	2081.55	2536.09	2104.86
f3.c5	2078.73	1748.86	1969.85	2399.72	1991.97	2078.73	1748.86	1969.85	2399.72	1991.97
f3.c6	2055.23	1729.05	1947.51	2372.44	1969.39	2055.23	1729.05	1947.51	2372.44	1969.39
f3.c7	1169.74	982.98	1106.04	1345.07	1118.98	1169.74	982.98	1106.04	1345.07	1118.98;

```
table
```

```
tct(f,c) tempo ciclo do fornecedor f ao cliente c
```

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
f1	11.09	9.13	16.47	15.17	10.72	14.42	15.01
f2	6.38	13.34	6.34	11.13	10.72	14.42	8.59
f3	17.17	20.17	17.92	12.92	12.30	12.17	7.47;

```
table
```

```
ra(f,c) disponibilidade do fornecedor f atender o cliente c 1 para sim e 0 contrario
```

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
f1	1	1	0	0	1	0	0
f2	0	0	1	1	0	1	0
f3	0	0	0	0	0	0	1;

```
table
```

```
n(f,t) numero de veiculos t disponivel no fornecedor f
```

	t1	t2	t3	t4	t5	tc1	tc2	tc3	tc4	tc5
f1	6	5	0	0	0	100	100	100	100	100
f2	0	6	6	4	0	100	100	100	100	100
f3	0	0	0	0	8	100	100	100	100	100;

```
variables
```

```
x(f,c,t) n. vezes transporte t foi utilizado pelo fornecedor f para cliente c
```

```
y(t,f) total de veiculo t utilizado pelo fornecedor f
```

```
z guarda valor da função objetivo;
```

```
integer variables x(f,c,t);
```

```
integer variables y(t,f);
```

```
x.up (f,c,t)=1000;
```

equations

F1 função objetivo

R1(c) restrição atendimento da demanda

R2(f) restrição capacidade do fornecedor

R3(t,f) restrição tempo ciclo do veiculo

R4(t,f) restrição numero de veiculos;

F1..z=e=sum((f,c,t),x(f,c,t)*q(f,t)*custo(f)+x(f,c,t)*frete(f,c,t))+sum((t,f),alfa(t)*y(t,f));

R1(c)..sum((t,f),x(f,c,t)*q(f,t)*pci(f)*ra(f,c))=g=d(c);

R2(f)..sum((t,c),x(f,c,t)*q(f,t))=l=k(f);

R3(t,f)..sum((c),x(f,c,t)*tct(f,c))=l=dh(t)*y(t,f);

R4(t,f)..(y(t,f))=l=n(f,t);

model transportebiomassa /all/

solve transportebiomassa using mip minimizing z;

display x.l,x.m,y.l,y.m,tct,q;