

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

**Análise de viabilidade econômica do emprego do bagaço de cana-de-açúcar  
como combustível na fabricação de suco de laranja**

Arthur Taqueda Melo

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química  
da Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alice Medeiros de Lima

São Carlos – SP  
30 de março de 2022

## **BANCA EXAMINADORA**

---

### **Orientadora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alice Medeiros de Lima  
DEQ – UFSCar

---

### **Membro da Banca**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elena Santos Taqueda  
DEQ – USP

---

### **Professor da Disciplina**

Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Fabio Bentes Freire  
DEQ – UFSCar

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de São Carlos e todos os professores que contribuíram durante esses anos.

Aos meus avós Moacir, Joelina, Roberto e em especial Maria Elena – que, além de ter contribuído na escolha de carreira, me ajudou em todos os momentos dessa jornada.

Aos meus pais, que estiveram comigo nos piores e melhores momentos me apoiando apesar da distância.

À minha família de Aracaju e São Paulo, dando suporte e aconselhando sempre.

À Profª Alice, por guiar e organizar a condução deste trabalho sempre de forma calma e objetiva.

Aos meus amigos de Aracaju e São Carlos, por fazer os momentos mais difíceis tornarem-se mais leves.

## RESUMO

O Brasil é o maior produtor de sucos de laranja do mundo e tem em seu mercado inúmeras marcas de suco além de ser um dos maiores exportadores. Dentre os principais processos de produção de suco de laranja destacam-se os sucos integrais e os concentrados. Os sucos integrais também conhecidos como *not from concentrate* (NFC), são sucos com menor grau de processamento e conseqüentemente menor tempo de vida nas prateleiras que ganharam um destaque maior nos últimos anos devido a procura por hábitos mais saudáveis. Já os sucos concentrados são também conhecidos como *Frozen Concentrate Orange Juice* (FCOJ), são sucos com maior validade e, por serem concentrados, de mais fácil exportação. O Estado de São Paulo é responsável por cerca de 70% da safra nacional de laranjas, além disso a presença de diversas usinas sucroalcooleiras acarreta possíveis mudanças na escolha do combustível utilizado nas caldeiras. Atualmente, há no mundo uma busca por combustíveis menos poluentes que sejam economicamente viáveis e levando em consideração essa tendência buscou-se com esse trabalho avaliar a substituição de dois combustíveis, o gás natural e o cavaco utilizados em cada um dos processos indicados por bagaço de cana, que é um insumo muito encontrado na região, utilizando como metodologia dados da literatura e simulação do processo realizado nas caldeiras e turbogeradores. A partir dos resultados foi possível concluir que a substituição do gás natural pelo bagaço de cana é, não só economicamente viável, havendo uma diferença de 0,346 R\$/kwh no custo, sendo 84,43% de economia no total, como ambientalmente aconselhável. Pouco pode-se concluir na comparação com o cavaco de eucalipto.

**Palavras-chave:** Processamento de suco de laranja. Bagaço de cana. Combustíveis renováveis. Simulação de processos. Viabilidade econômica. Meio ambiente.

## ABSTRACT

Brazil is the greatest orange juice producer in the world and while it has countless juice brands, it also is the greatest exporter of the product. Among the main orange juice processes the Not From Concentrate (NFC) and Frozen Concentrate Orange Juice (FCOJ) processes stand out. The NFC juice are made with less processing degree than the average, having less shelf life. In the recent years they have gained prominence due to the search of healthy habits. The FCOJ on the other hand have a greater shelf life and, due to concentration, are easily transported. The Estate of São Paulo is responsible for almost 70% of national harvest of the orange fruit, besides the great number of sugarcane power plants influences the boiler's fuel choice. Nowadays, there is a preference for less pollutant fuels that are economically viable and considering this tendency this paper looks forward to evaluate the substitution of two fuels, natural gas and wood chips, used and both indicated processes, for sugarcane bagasse, a largely available input in the region. This work is based in literature data and boiler and generator process simulations. From the results it was possible to conclude that replacing natural gas with sugarcane bagasse not only is economically viable, having a difference of 0,346 R\$/kwh in cost, with total cost reduction of 84,43%, as it is ambiently recommendable. Little can be concluded in wood chips and bagasse comparison.

**Keywords:** Orange juice processing. Sugarcane bagasse. Renewable fuels. Process simulation. Economic viability. Environment.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Exportações de suco de laranja no mundo em milhões de dólares
- Figura 1.2 – Exportações de suco integral (*NFC*) e concentrado (*FCOJ*)
- Figura 1.3 – Participação no mercado
- Figura 2.1 – Fluxograma dos principais produtos do suco de laranja
- Figura 2.2 – Esquema de produção de suco de laranja
- Figura 2.3 – Funcionamento da extratora Brown
- Figura 2.4 – Funcionamento da extratora FMC
- Figura 2.5 – Evaporador TASTE
- Figura 2.6 – Esquema simplificado evaporador TASTE
- Figura 2.7 – Demanda projetada de gás nas indústrias
- Figura 3.1 – Processo completo de produção de suco integral
- Figura 3.2 – Processo completo de produção de suco concentrado
- Figura 3.3 – Simulação para demanda de bagaço – suco integral
- Figura 3.4 – Simulação para demanda de bagaço – suco concentrado
- Figura 4.1 – Comparação entre os combustíveis empregados
- Figura 4.2 – Comparação safra 2021/22 para o suco integral
- Figura 4.3 – Comparação safra 2021/22 para o suco concentrado

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Estágio de maturação ideal laranjas

Tabela 3.1 – Operações utilizadas para contabilização de energia

Tabela 3.2 – Operações utilizadas para contabilização de energia

Tabela 4.1 – Consumo energético para produção de suco integral

Tabela 4.2 – Consumo energético para produção de suco concentrado

Tabela 4.3 – Consumo de gás natural

Tabela 4.4 – Consumo de cavaco

Tabela 4.5 – Consumo de bagaço de cana – suco integral

Tabela 4.6 – Consumo de bagaço de cana – suco concentrado

Tabela 4.7 – Custos relativos dos combustíveis

Tabela 4.8 – Consumo energético para produção de suco integral – Safra 2021/22

Tabela 4.9 – Volume de combustível e custos para produção de suco integral – Safra 2021/22

Tabela 4.10 – Consumo energético para produção de suco concentrado – Safra 2021/22

Tabela 4.11 – Volume de combustível e custos para produção de suco concentrado – Safra 2021/22

Tabela 4.12 – Pegada de carbono por combustível empregado

# Sumário

1	Introdução e Objetivos .....	10
1.1	Introdução.....	10
1.2	Objetivos .....	13
2	Revisão Bibliográfica.....	14
2.1	Suco de laranja - principais produtos .....	14
2.1.1	Colheita.....	16
2.1.2	Recepção dos Frutos.....	17
2.1.3	Extração e <i>Finishing</i> .....	17
2.2	Suco Integral, Not From Concentrate (NFC).....	19
2.3	Suco concentrado congelado, <i>Frozen Concentrate Orange Juice (FCOJ)</i> .....	20
2.4	Combustíveis utilizados.....	24
2.4.1	Gás Natural .....	25
2.4.2	Cavaco .....	26
2.4.3	Bagaço de Cana .....	26
2.5	Aspectos ambientais .....	26
2.5.1	Gás natural e biomassa.....	27
2.5.2	Análise do ciclo de vida e <i>Waste Reduction (WAR) algorithm</i> .....	27
3	Metodologia.....	29
3.1	Processamento do suco integral.....	29
3.1.1	Método de cálculo da energia elétrica teórica .....	32
3.1.2	Método de cálculo da energia braçal teórica.....	32
3.1.3	Método de cálculo da energia térmica teórica .....	32
3.2	Processamento do suco concentrado .....	33
3.2.1	Método de cálculo da energia elétrica .....	35
3.2.2	Método de cálculo da energia térmica .....	35
3.3	Análise energética dos processos.....	36
4	Resultados e Discussão .....	41
4.1	Consumo energético dos processos .....	41
4.2	Consumo de combustível.....	42
4.3	Análise econômica .....	44
4.4	Análise econômica – Safra 2021/22 .....	46



<b>4.5 Análise ambiental .....</b>	<b>49</b>
<b>5 Conclusão.....</b>	<b>51</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>53</b>
<b>Apêndice A .....</b>	<b>57</b>
<b>    Cálculo da energia térmica suco de laranja concentrado .....</b>	<b>57</b>

# 1 Introdução e Objetivos

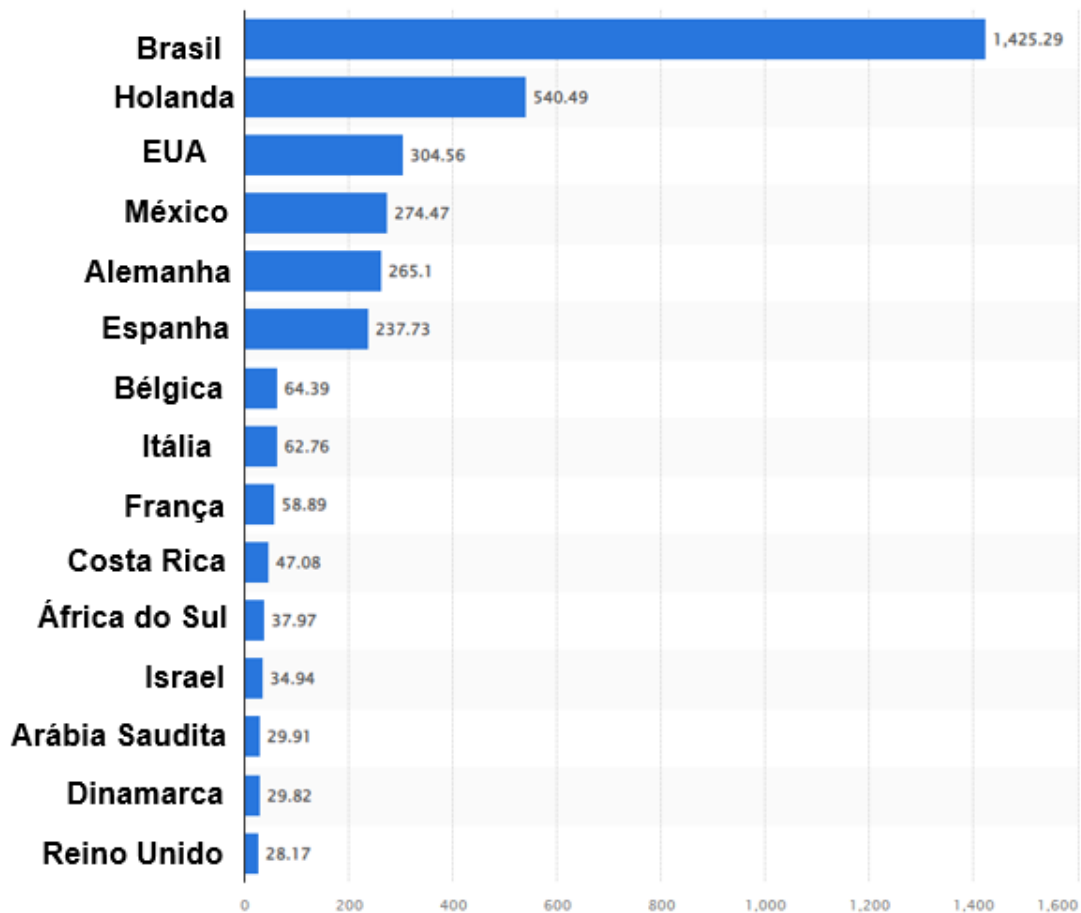
## 1.1 Introdução

No século XX a exportação da laranja começou a ganhar destaque como grande potencial econômico, fazendo com que, na década de 1930, grandes produtores das regiões sul e sudeste do Brasil começassem a plantá-la. Já na década de 1980 o Brasil se tornou o maior produtor de laranja do mundo, desbancando os Estados Unidos. Hoje o país produz 61% de todo o suco consumido no mundo sendo a laranja a fruta mais produzida do mundo e seu mercado movimentado cerca de US\$ 7,5 trilhões anualmente. Estima-se que sejam produzidas 75 milhões de toneladas de laranja no mundo por ano, distribuídas em 4,5 bilhões de hectares (Summit Agro, 2022).

O Brasil é o maior produtor mundial do fruto, responsável pela produção média de 16,5 milhões de toneladas (a maioria usada na produção de suco para exportação), seguido pela China, com pouco mais de 7,6 milhões de toneladas e EUA, com 3,6 milhões. (FAO, 2022). O país lidera também a exportação de suco de laranja arrecadando US\$ 1.425,29 milhões, como pode ser visto na Figura 1.1, seguido da Holanda com US\$ 540,49 milhões, Estados Unidos com US\$ 304,56 milhões.

O estado de São Paulo é responsável por cerca de 77% da produção. Atualmente a indústria exportadora nacional é composta por três grandes companhias: Cutrale, Citrosuco e Louis Dreyfus.

**Figura 1.1 – Exportações de suco de laranja no mundo em milhões de dólares**



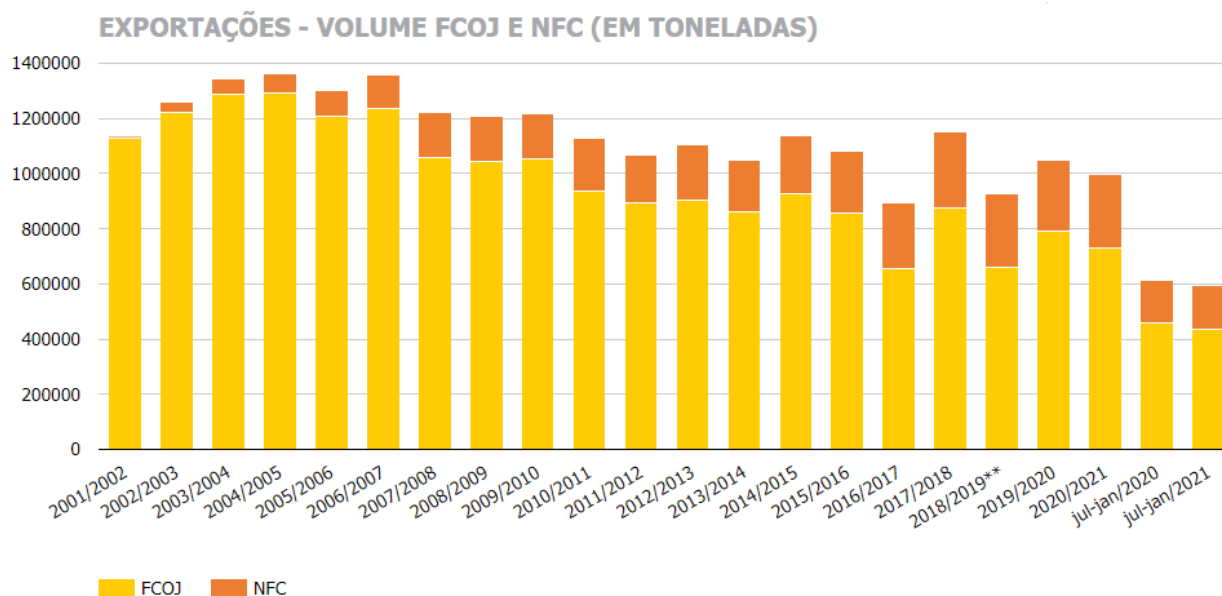
**Fonte:** adaptado de Statista (2020)

O suco de laranja é majoritariamente comercializado em duas formas, a principal é através do suco concentrado congelado (*Frozen Concentrated Orange Juice – FCOJ*) que surgiu com a introdução do evaporador *TASTE* durante o período de 1960 e meados de 1990, tornando o suco comercialmente viável por meio da redução do volume e estabilização. Após a década de 1990 o suco integral (*Not From Concentrate – NFC*)

aumentou consideravelmente, sendo uma opção mais próxima a encontrada pelo suco *in natura* passando apenas por um processamento simples, onde é pasteurizado e armazenado a frio por até um ano (Louise Wicker, 2004).

O histórico de exportação brasileira pode ser visto na Figura 1.2, nela é possível notar um certo crescimento na exportação de suco concentrado até 2007, seguido por uma queda acentuada até hoje, a principal razão para isso é o desafio de se manter no posto de principal exportador enquanto vê muitos países avançando tecnologicamente (Summit Agro, 2022), além disso houve o surgimento do competidor suco integral, que conserva melhor as características do suco *in natura*, como nutrientes, sabor e aroma. Em 2020/2021 o Brasil exportou 729.719 toneladas de suco concentrado e 269.081 toneladas de suco integral. O maior importador de suco concentrado brasileiro é a Europa, com cerca de 66% do total de exportações, seguido dos Estados Unidos, com cerca de 21% e o Japão com 5,6% como pode ser visto na Figura 1.3.

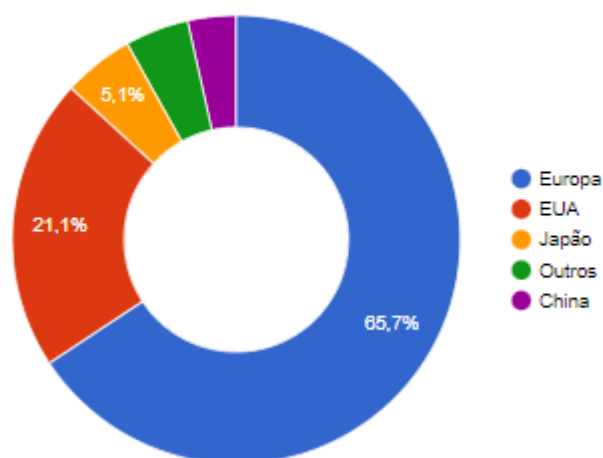
**Figura 1.2 – Exportações de suco integral (NFC) e concentrado (FCOJ)**



Fonte: adaptado de CitrusBR (2022)

**Figura 1.3 – Participação no mercado**

(em toneladas de FCOJ Equivalente a 66° BRIX)



**Fonte:** adaptado de CitrusBR (2022)

## 1.2 Objetivos

Dada importância da comercialização do suco de laranja no país, o presente trabalho tem como objetivo avaliar econômica e ambientalmente o emprego do bagaço na geração de energia para suprir esse processo. Para esse fim, foram utilizados dados da literatura para consolidação do consumo energético em cada um dos processos, simulações contendo as operações responsáveis pela geração de energia e adequação de cada uma das análises para comparação direta.

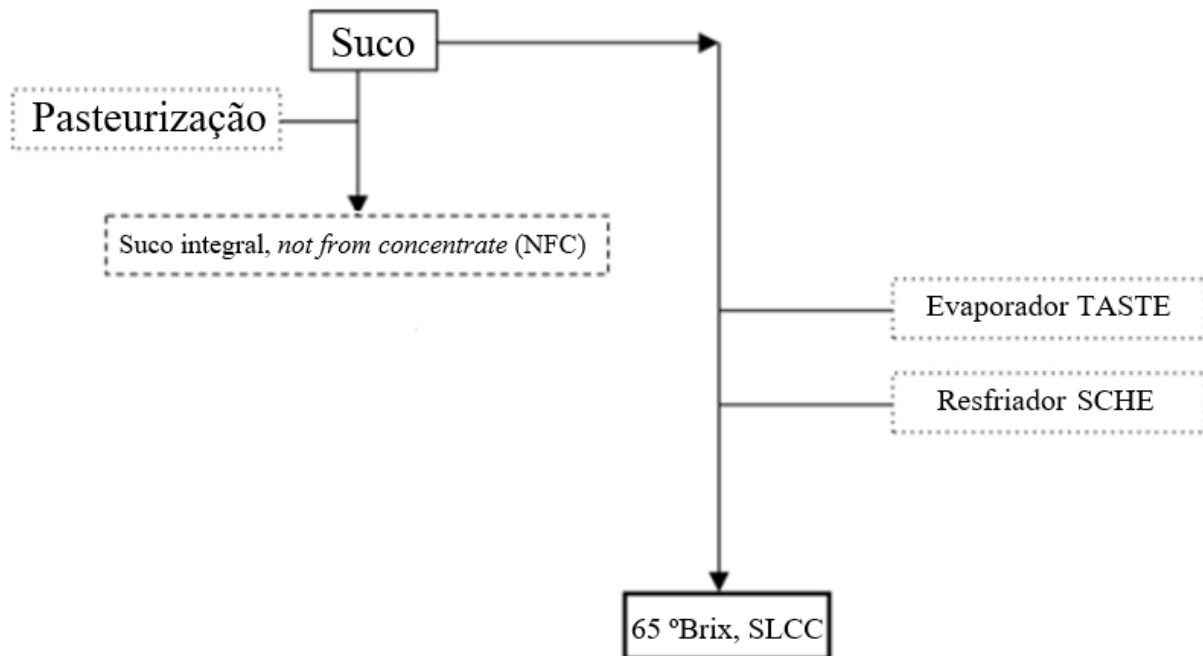
## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Suco de laranja - principais produtos

O suco de laranja espremido na hora e não pasteurizado é um produto muito desejado pelo consumidor devido ao aroma fresco e sabor, no entanto sua validade é de apenas 20 dias se refrigerado a 1°C. Assim sendo, para viabilizar o uso comercial deste produto deve-se tratá-lo num processo industrial envolvendo uma pasteurização, que irá reduzir a susceptibilidade à atividade bacteriana e da pectinesterase, uma enzima que acelera a reação de hidrólise da pectina causando a separação de fases do suco e alterando a aceitação do produto para os consumidores.

Atualmente o principal produto dessa indústria é o suco de laranja congelado concentrado (SLCC) ou do inglês *frozen concentrate orange juice* (FCOJ), de acordo com a Sociedade Nacional de Agricultura (SNA, 2019) a produção de FCOJ representa cerca de 70,71% da exportação de suco de laranja brasileira. Seguido do *not from concentrate* (NFC) que é uma tendência do mercado por apresentar um sabor mais próximo do suco fresco. A Figura 2.1 ilustra os principais produtos do suco de laranja.

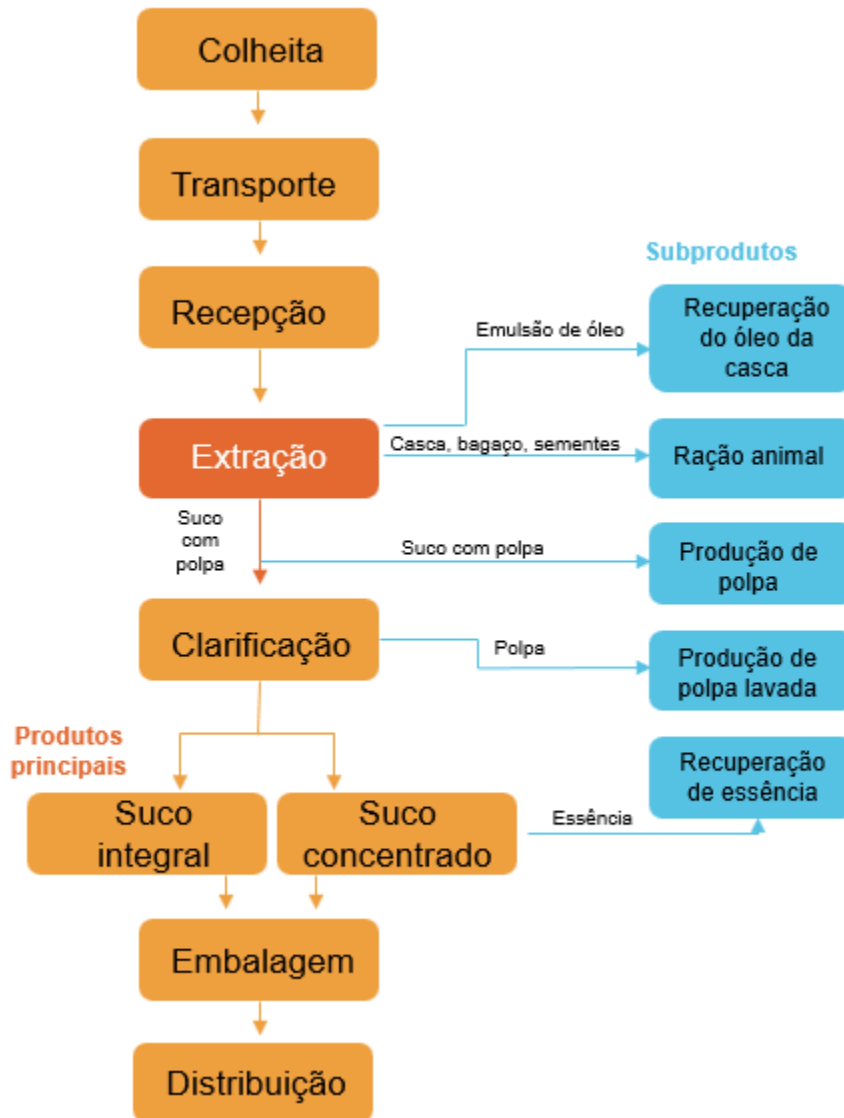
**Figura 2.1 - Fluxograma dos principais produtos do suco de laranja**



**Fonte:** adaptado de Louise Wicker (2004)

Ambos os processos seguem etapas parecidas em sua fabricação que serão melhor explicadas a seguir no esquema da Figura 2.2.

**Figura 2.2 - Esquema de produção de suco de laranja**



**Fonte:** Adaptado de Tetrapak (2022)

### 2.1.1 Colheita

Para a colheita o fruto deve apresentar um estágio de maturação ideal para consumo, melhor indicado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Estágio de maturação ideal laranjas**



Mínimo de suco (%)	35-45
Sólidos solúveis (°Brix)	9-10
Ratio (°Brix/acidez)	8,5-10

**Fonte:** EMBRAPA, 2003

Os frutos de qualidade adequada são então colhidos manualmente ou através de colheitadeiras, locais com mão de obra barata geralmente preferem a colheita manual como é o caso do Brasil.

Além disso há algumas regras que devem ser seguidas na colheita realizada no Brasil, como respeitar o intervalo de segurança dos agrotóxicos e a higienização de quaisquer equipamentos usados na colheita (EMBRAPA, 2003).

Após a colheita os frutos são distribuídos em caixas (40,8 kg/caixa) e seguem para a planta de processamento.

### **2.1.2 Recepção dos Frutos**

No Brasil o transporte ocorre geralmente por caminhões, após a descarga esses frutos passam por um processo de inspeção para remoção de frutas danificadas, jatos de ar ou água são utilizados para remoção de folhas e galhos e em seguida passam por uma lavagem seguindo o plano HACCP (Schmidt et al., 1997). Por fim, guardadas em caixas de armazenamento seguem para o uso contínuo na fábrica.

É nessa fase do processo em que uma pequena porção é separada para análises laboratoriais de acidez, °Brix e rendimento de suco (Sandhu S. Kulwant, 2006).

### **2.1.3 Extração e *Finishing***

Essa etapa é responsável pela separação dos produtos provenientes da fruta, deve ser feita de forma rápida de forma a evitar danos irreparáveis na qualidade. O *finishing* é responsável por remover excesso de polpa, pedaços de casca e sementes.

Usualmente dois tipos de extratores são utilizados, Brown e FMC (Louise Wicker, 2004). A extratora Brown opera cortando a fruta ao meio ajustando em um copo e extrai o suco espremendo as metades, podendo ser escolhida uma maior ou menor pressão a depender do produto final de desejo, como observado na Figura 2.3. A alta pressão ocasiona um maior rendimento, no entanto maior presença de limoneno, pectinesterase, polpa e pectina. Por sua vez, extração a baixa pressão resultam em níveis melhores de coloração e sabor.

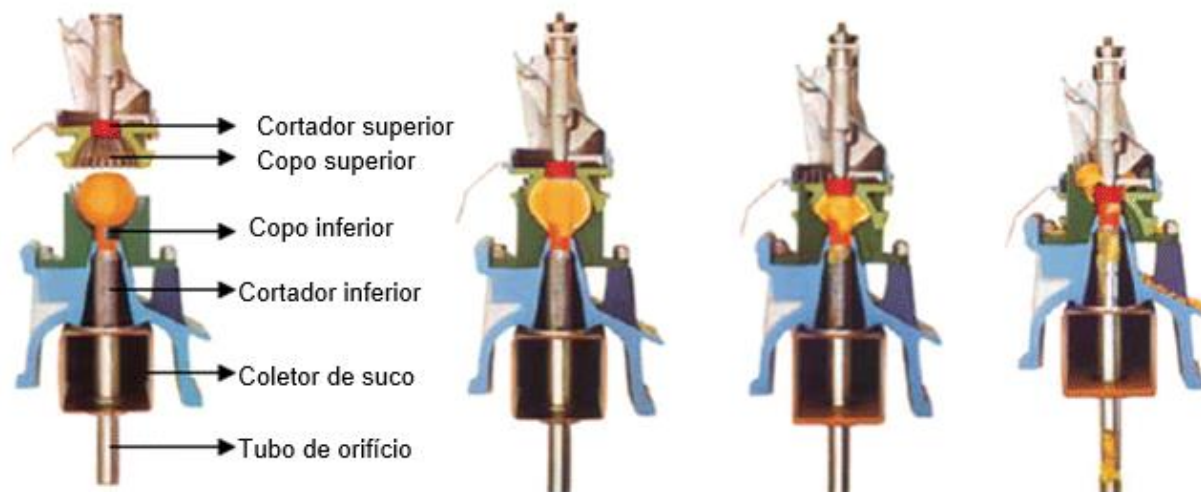
**Figura 2.3 - Funcionamento da extratora Brown**



**Fonte:** Brown International Corporation, 2018

A extratora FMC opera alocando a fruta entre dois copos seccionados, a alta pressão separa o suco e atua como um pré-finishing, como pode ser visto na Figura 2.4.

**Figura 2.4 - Funcionamento da extratora FMC**



**Fonte:** Adaptado de Asiye Akyildiz (2014)

A escolha do equipamento depende da capacidade, rendimento e qualidade do produto desejado pela fábrica.

## 2.2 Suco Integral, Not From Concentrate (NFC)

Sucos cítricos são sensíveis ao calor e por conta disso as vitaminas, aroma e sabor delicados podem ser perdidos ou ao menos danificados durante o processo de pasteurização utilizado na fabricação do NFC, portanto esta etapa ocorre o mais rapidamente possível. Algumas estratégias são utilizadas para reduzir essas perdas. Uelgen (1993) propõe uma otimização da destruição bacteriana, desativação enzimática e retenção de vitamina C levando em consideração o papel do pH na pasteurização.

As condições ótimas para pasteurização são 12 minutos a 75°C e pH 2,7, no entanto, o tempo de retenção e temperatura são definidos em função do pH que por sua vez se eleva de acordo com a safra, necessitando de tratamentos mais severos no fim da safra (Senai, 1991).

Comercialmente o suco é rapidamente aquecido até a temperatura de aproximadamente 92°C a depender do equipamento utilizado. O aquecimento pode durar uma fração de segundo até 40s, utilizando um trocador de calor tubular ou de placas que utilizam vapor para o aquecimento e água no resfriamento.

Recentemente, outras técnicas vêm sendo estudadas para a pasteurização do suco assim como o efeito desses processos na composição e qualidade do produto. As propriedades físicas, químicas e organolépticas assim como os componentes voláteis do suco são afetados pela pasteurização em vários níveis a depender da técnica utilizada (Min et al., 2003; Gil et al., 2002).

### **2.3 Suco concentrado congelado, *Frozen Concentrate Orange Juice* (FCOJ)**

A concentração de sucos permite uma vantagem econômica ao embalar, armazenar e distribuir. Além de aumentar consideravelmente o período de utilização de frutas perecíveis durante os períodos de pico na colheita.

O suco de laranja possui aproximadamente entre 85-90% de água em sua composição; durante a etapa de concentração a maior parte dessa água é removida. Normalmente para preparação do suco de laranja concentrado usa-se uma matéria prima recém extraída ou pasteurizada.

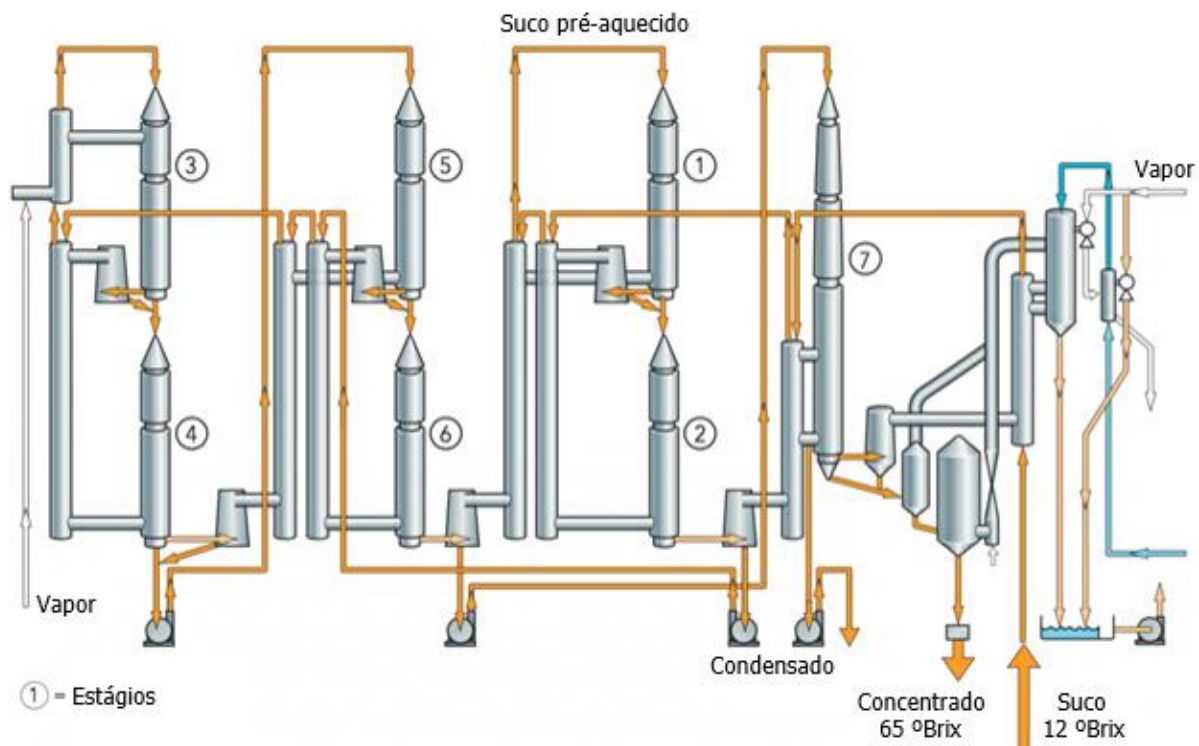
O primeiro evaporador para produção de uso comercial do suco de laranja foi o evaporador de filme descendente (*falling-film*) desenvolvido em Plymouth, Florida pela Vacuum Foods Company. Consistia em uma série de cilindros de aço inoxidável com um dispositivo de spray, aquecimento com água e um sistema de remoção de vapor, este evaporador conseguia produzir um concentrado com 42°Brix. (Sandhu S. Kulwant, 2006).

Em seguida, a Skimmer Company desenvolveu evaporadores *falling-film* com um aumento na eficiência utilizando múltiplos efeitos, necessitando de um longo tempo de residência. A modelagem de múltiplos efeitos para *falling-film* foi estudada por Angeletti e Moresi (1983) que combinou o modelo matemático clássico para múltiplos efeitos com uma estimativa acurada do coeficiente global de troca térmica em evaporadores de filme

descendente (*falling-film*), utilizando uma correlação para o fator de incrustação ( $R_d$ ) desenvolvida por Narayanamurthy e Sarma (1977).

No início dos anos 1960 os evaporadores de baixa temperatura, como os citados anteriormente, foram substituídos pelos evaporadores TASTE, do inglês *Thermally Accelerated Short Time Evaporator*. (Louise Wicker, 2004). A Figura 2.5 esquematiza o funcionamento deste evaporador.

**Figura 2.5 - Evaporador TASTE**



**Fonte:** Adaptado de Tetrapak (2022)

Por ter passagem única o evaporador TASTE tem curta exposição a temperatura, baixos  $\Delta T$ 's (menor chance de queima do suco), melhor remoção de ar, preaquecimento e melhor distribuição do suco. Estes evaporadores são projetados para produzir suco concentrado de alta qualidade a custo de operação baixo. O escoamento padrão e outras características do projeto podem variar de acordo com a aplicação particular.

O evaporador TASTE, como já mencionado, tem passagem única com múltiplos efeitos e estágios, normalmente entre quatro e sete efeitos e entre seis e oito estágios. Seu funcionamento é descrito pela fabricante Cook Machinery LLC (2022). A Figura 2.6 representa simplificada o funcionamento do evaporador TASTE. O suco é alimentado a temperatura ambiente através de tanques de alimentação (1), podendo permanecer até 30 minutos em estoque. O suco entra no evaporador e percorre através de preaquecedores interestágios e condensadores de essências. O suco vai ao primeiro estágio que está a uma temperatura intermediária para proporcionar uma eficiente remoção de ar e de aromas. O estabilizador do suco (pasteurizador) é anterior ao estágio mais quente, que é usualmente o segundo ou terceiro estágio.

Na medida que o suco avança no processo ele é bombeado através de bicos que reduzem a área e aumentam a velocidade a cada passagem sendo distribuído em uma seção que causa uma expansão abrupta da alimentação, causando uma evaporação súbita, atomizando o líquido e transformando numa mistura com vapor do solvente que preenchem a área de distribuição e seguem para tubos no corpo do estágio. Essa mistura acelera pelos tubos na medida em que absorve o calor a partir das paredes dos tubos e como o aquecimento se dá a pressão constante em um estágio, a evaporação ocorre a temperatura constante, conforme a água presente no suco evapora a velocidade da mistura aumenta. Alguns estágios são compostos de mais de um feixe de tubos. Isso permite menos tubos com altas velocidades no início do estágio dificultando a aderência e a queima do suco. O suco e a água evaporada saem pelo fundo do feixe tubular. O vapor do solvente é direcionado para um ciclone, tipo de separador líquido-vapor (2), onde o vapor é separado de qualquer produto arrastado. O suco é então transferido por bomba ou por gravidade ao próximo estágio.

Cada efeito remove uma quantidade aproximadamente igual de água, o mais comum é um sistema com cinco efeitos que remove cerca de 20% do volume total de água por efeito. Vale lembrar que o suco passa por um aquecedor após cada efeito para elevar sua temperatura. Após passar por todos os estágios de um mesmo efeito o suco concentrado é enviado (seja por gravidade ou por bombas) para um resfriador flash, que opera em vácuo, eleva concentração do suco em 2ºBrix e reduz sua temperatura, necessitando o aquecimento para o próximo efeito.

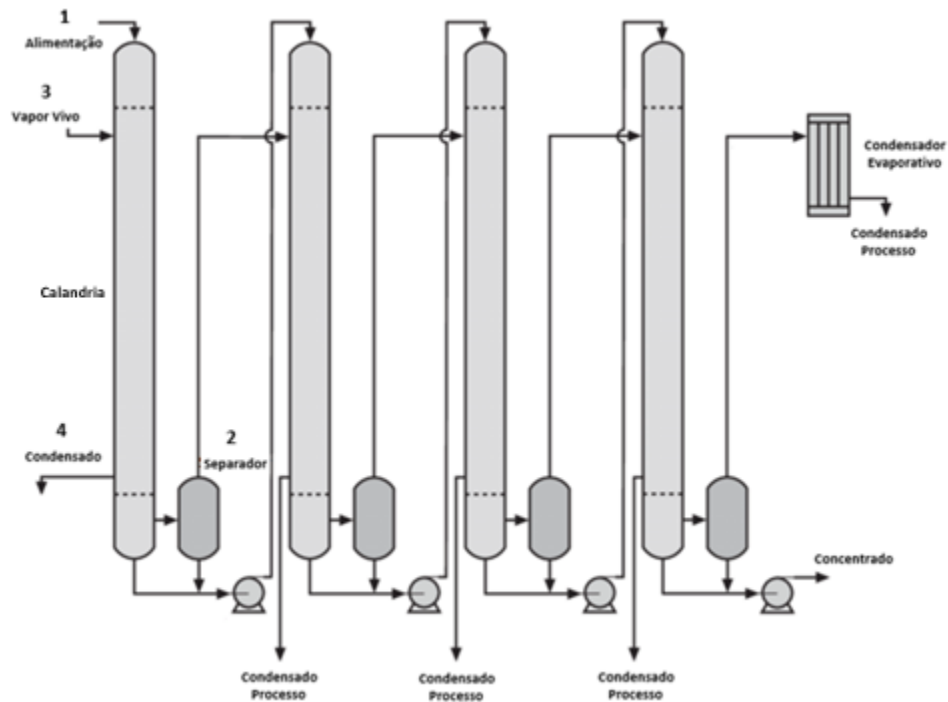
O vapor vivo (*steam*) entra no lado casco do evaporador no último aquecedor e no primeiro efeito (3), tendo pressão atmosférica na maioria dos casos, embora possa ser levemente pressurizada elevando a pressão, antes atmosférica, em cerca de 0,35 bar. O vapor do solvente que sai do primeiro efeito tem pressão menor que o vapor de aquecimento e é utilizado para aquecer o segundo efeito, o vapor do solvente do segundo efeito também tem pressão menor que o vapor do efeito anterior e é usado para aquecer o terceiro efeito, assim por diante até o último efeito. O condensado do vapor vivo sai no fundo do primeiro efeito (4) e é usado como água de aquecimento na caldeira, como é feito usualmente, já o condensado do solvente é “*flasheado*” por um orifício no segundo efeito e segue para o terceiro efeito e assim por diante até o último efeito, onde seguem até um lavador (*stripper*) para remoção de componentes aromáticos que poderão ser reincorporados no suco.

No último efeito é geralmente utilizado um condensador evaporativo, que condensa o vapor do solvente do último efeito utilizando uma água de resfriamento e gerando um vácuo no sistema. Pode-se usar, ainda que cada vez menos comum, um condensador barométrico.

Uma última diferença notável nos evaporadores TASTE é a presença de ventiladores para recuperação da essência geralmente acoplado no segundo efeito, onde tem a maior recuperação. Seguindo por fim para um condensador de essência onde o ar será removido num sistema à vácuo seguindo para a atmosfera.

Detalhes de operação destes evaporadores podem ser vistos em Cook Machinery LLC (2022).

### **Figura 2.6 - Esquema simplificado evaporador TASTE**



**Fonte:** Adaptado de Dale Monceaux (2009)

## 2.4 Combustíveis utilizados

Dentre os principais combustíveis utilizados para o aquecimento de caldeiras temos os combustíveis líquidos como óleo diesel e óleo combustível, sendo o óleo diesel pouco usado por conta do custo elevado. Atualmente o combustível mais utilizado para alimentação de caldeiras é o óleo combustível, apesar de ainda ser o principal combustível seu uso vem sendo reduzido gradativamente, perdendo espaço para os combustíveis menos poluentes como gás natural e bagaço de cana (ONS, 2022).

Entre os combustíveis gasosos os principais representantes são o gás natural e o GLP (gás liquefeito de petróleo). O gás natural tem em sua composição majoritariamente a presença do metano, que por ser um hidrocarboneto de cadeia curta é menos poluente que os combustíveis derivados de petróleo (BNDES, 2021) e por isso vem se tornando uma escolha competitiva para combustível de caldeiras.



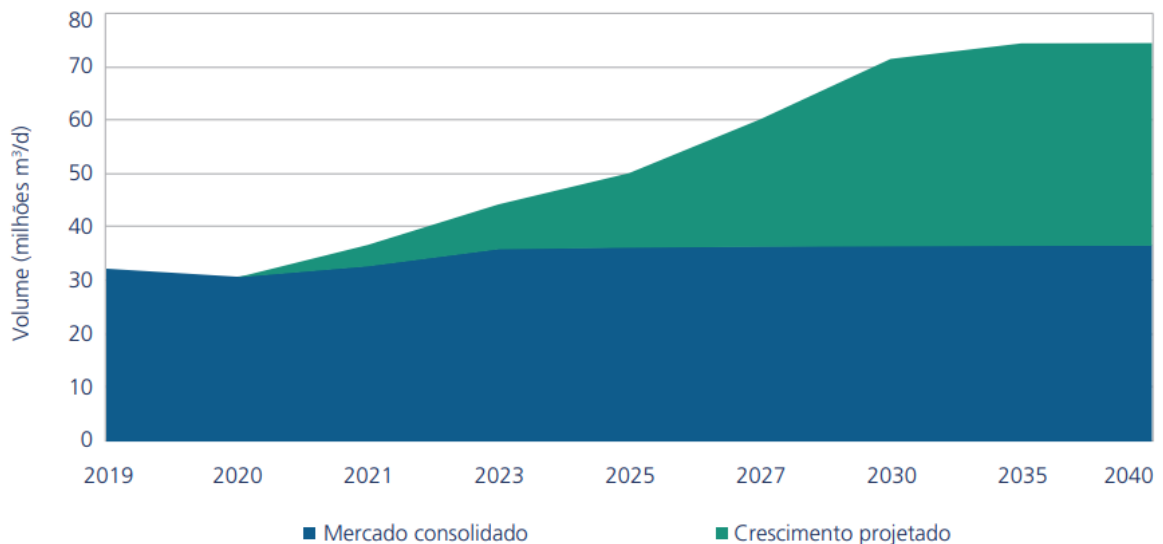
Já entre os combustíveis sólidos o principal representante é a biomassa, que se apresenta em muitas formas e características, podendo ser derivados de madeira como lenha ou o cavaco ou subprodutos da indústria sucroalcooleira, caso do bagaço.

### 2.4.1 Gás Natural

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves que permanece no estado gasoso à temperatura ambiente e pressão atmosférica. É incolor e inodoro e oferece uma combustão limpa, isenta de agentes poluidores, como fuligem, sendo mais aceito que outros combustíveis de petróleo consolidados no mercado dentro de um viés ambiental.

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) em um relatório de 2021 o gás natural terá um crescimento de demanda devido a mudanças e competitividade vislumbradas para o Novo Mercado de Gás (programa do governo federal que visa um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo), as indústrias esperam mais do que dobrar seu consumo atual de gás natural, podendo superar 70 milhões de m<sup>3</sup>/dia em 2030.

**Figura 2.7 - Demanda projetada de gás nas indústrias**



**Fonte: BNDES (2021)**

## **2.4.2 Cavaco**

O cavaco de madeira é um conjunto de pequenos pedaços de madeira obtidos pela picagem de toras, sobras de indústrias e serrarias e representa uma excelente forma de energia renovável.

O Brasil tem um forte potencial na produção de cavaco devido à suas características geográficas e do modelo econômico do país. Em estudo realizado pela *Brazilian Journal of Wood Science* (2017) que avaliou o período de 2005 a 2014 observou-se que o Brasil é essencialmente um país exportador de cavaco de madeira, evidenciando esse potencial de crescimento.

## **2.4.3 Bagaço de Cana**

A produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana é uma opção não só viável como de interesse para o país, uma vez que o Brasil é um dos países com a matriz energética mais limpa do planeta, e um dos motivos é por ser o maior produtor de etanol a partir da cana-de-açúcar. O bagaço é hoje uma das fontes renováveis de biomassa preferidas para alimentação de caldeiras no Brasil, apresentando cerca de 77% da biomassa utilizada para produção de energia elétrica no país, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2022).

Atualmente apenas 15% do potencial energético através do bagaço é aproveitado, a bioeletricidade teria potencial técnico para gerar 148 mil GWh, o que representaria mais de 30% do consumo de energia do Sistema Integrado Nacional (SIN). Há ainda uma previsão de 55% de crescimento até 2030 (UNICA, 2020).

Sendo assim, existe a possibilidade de substituição dos combustíveis tradicionais pelo bagaço para adequação econômica e é o que será proposto a seguir.

## **2.5 Aspectos ambientais**

### 2.5.1 Gás natural e biomassa

Do ponto de vista ambiental o gás natural se apresenta como um combustível mais adequado que os outros combustíveis fósseis. A principal razão é ser formado majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ), que é uma molécula composta por apenas um átomo de carbono para cada quatro átomos de hidrogênio, o baixo número de carbono faz com que a queima do gás natural seja mais limpa, produzindo menor quantidade de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e particulados entre todos os combustíveis fósseis. (BNDES, 2021).

Além disso, combustíveis provenientes de biomassa, como o cavaco e o bagaço, apresentam uma vantagem ainda maior. A biomassa contém energia química armazenada do sol através da fotossíntese, podendo ser queimada diretamente (seu uso mais comum) ou convertida em combustíveis renováveis líquidos ou gasosos através de vários procedimentos. (EIA, 2021). O balanço de carbono para biocombustíveis pode ser descrito da seguinte forma: o carbono é absorvido da atmosfera pelas plantas e através da fotossíntese é convertida em celulose, que é usada para produzir biocombustíveis, esta é queimada liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de volta para atmosfera. O balanço líquido de carbono é contabilizado através da análise de conversão indireta do uso dos solos (*Indirect land use conversion – ILUC*) associada com a colheita de biomassa. Portanto, a biomassa é considerada um combustível neutro em carbonos (BTEC, 2021).

### 2.5.2 Análise do ciclo de vida e *Waste Reduction (WAR) algorithm*

Várias são as ferramentas de avaliação de impactos ambientais dentre elas existe a análise do ciclo de vida e a metodologia *Waste Reduction (WAR) algorithm*.

A análise do ciclo de vida refere-se ao ciclo físico formado pelos sucessivos estágios do processo de produção e comercialização de um bem ou serviço, desde a origem dos recursos produtivos no meio ambiente até a disposição final, passando por estágios intermediários como beneficiamento, transportes, estocagens e outros. Esse ciclo também é conhecido pela expressão do berço ao túmulo (*cradle to grave*) ou berço

ao berço. No primeiro caso o meio ambiente é a origem dos recursos usados (berço) e o depósito final dos seus restos inaproveitáveis (túmulo). Já no segundo, espera-se que os restos, além de mínimos, não causem danos ao meio ambiente e possam ser plenamente assimilados (J. C. Barbieri, 2016).

Esta técnica permite avaliar os impactos ambientais associados com a produção de um bem por uma gama de categorias, incluindo emissão de gases do efeito estufa (GEE), assim como outros, levando em consideração todas as entradas e saídas envolvidas no ciclo de produção e com o auxílio de bancos de dados (BTEC, 2021), podendo ser encontrados em softwares que são mais apropriados para cada tipo de estudo.

O *WAR (waste reduction) algorithm* é uma metodologia usada para avaliar quantitativa e relativamente o impacto ambiental de um processo químico. Diferente da análise do ciclo de vida, ela considera apenas o aspecto de fabricação do ciclo de vida do produto, sem considerar os demais aspectos (aquisição da matéria prima, distribuição, uso, descarte e reciclagem do produto). Sendo indicada para o estágio inicial do projeto ou como um estudo para melhoria de um processo já existente (D. Young et al, 2000).

### **3 Metodologia**

O estudo se propõe, através de uma análise energética para o processamento de dois tipos de suco, avaliar escolhas de combustíveis do ponto de vista econômico e ambiental. Para isso, buscou-se na literatura estudos que contemplassem ambos os processos com um detalhamento energético.

#### **3.1 Processamento do suco integral**

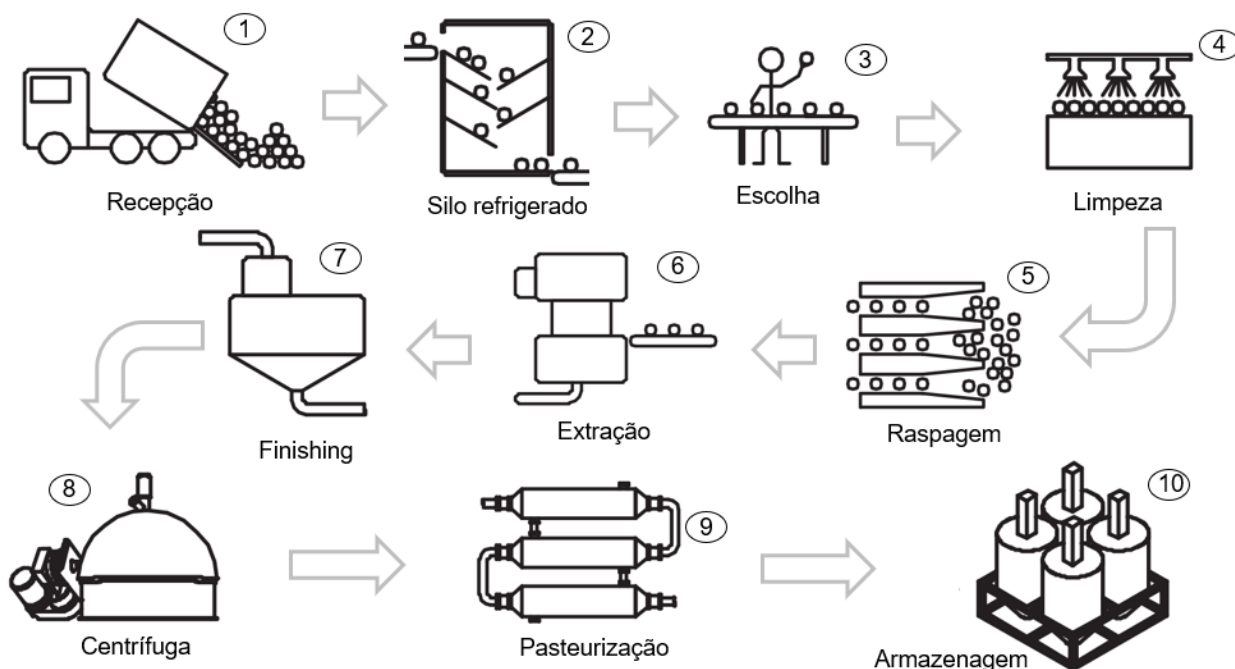
Devido a dificuldade de obtenção de dados abertos na literatura para este setor e, exclusivamente, para este tipo de análise, recorreu-se a um trabalho de uma fábrica localizada fora do território brasileiro.

Portanto, para a análise energética desse processo foi escolhido um estudo de uma fábrica localizada no oeste da Nigéria. Nela, oito operações principais foram escolhidas para contabilização energética sendo que essa contabilização foi determinada de acordo com o tipo específico de energia usada na operação especificada, podendo ser apenas uma ou uma combinação de energia elétrica, térmica ou braçal.

O processo completo conta com dez operações como mostrado na Figura 3.1. Inicialmente, as frutas são recepcionadas através de caminhões e pesadas através de uma balança rodoviária projetada para a pesagem com um caminhão carregado com frutas (1), o peso exato é determinado pela diferença entre o peso do caminhão carregado e do caminhão vazio. As frutas então são carregadas em uma esteira de cestos para armazenamento de até 3 dias num silo refrigerado (2). O processamento das frutas começa com a escolha manual (3) das frutas ruins, num critério que leva em conta tamanho, aspecto e cor. As frutas selecionadas passam por uma máquina (4) que tem como objetivo a lavagem e remoção de terra e outras partículas indesejadas do lote, esta máquina também possui uma esteira, escovas e tubos de água. Antes de seguirem para extratora, as frutas passam por uma raspagem da casca (5), onde os componentes que

podem causar amargor são retirados e análises laboratoriais são realizadas para identificar a quantidade de sólidos solúveis (°Brix) e acidez. O raspador é composto por lâmina de raspagem, um motor elétrico e tubos de água. O suco é extraído através de um tipo específico de extratora, o esmagador (6) e então passa pelo *finisher* (7) para remoção das sementes, sendo então enviado para uma centrífuga (8) onde o suco é levemente clarificado e temporariamente armazenado em um tanque para a mistura com outros componentes. O suco, então, segue para uma pasteurização (9) onde microrganismos presentes no suco são eliminados numa troca indireta com vapor gerado em uma caldeira, esse suco deve ser aquecido a uma temperatura limite que não perca suas propriedades naturais, conforme citado anteriormente neste trabalho. Por fim o suco é embalado com o uso de uma máquina que o envasa em caixas de papelão e é em seguida armazenado em ambiente refrigerado (10). Todos os motores elétricos foram devidamente identificados, com classificação de amperagem e potência, número de fases e voltagem anotadas para estimar o consumo de energia elétrica teórico que pode ser observado na Tabela 3.1.

**Figura 3.1 – Processo completo de produção de suco integral**



Fonte: Adaptado de J. Peter Clark (2009)

**Tabela 3.1 – Operações utilizadas para contabilização de energia**

Escolha	Número de pessoas envolvidas	4
	Tempo necessário para escolha (h)	5
Limpeza	Energia elétrica (kW)	4,48
	Tempo necessário para limpeza (h)	5
	Número de pessoas envolvidas	2
Separação	Energia elétrica (kW)	5,97
	Tempo necessário para separação (h)	6
Extração	Energia elétrica (kW)	17,9
	Tempo necessário para separação (h)	6
Finishing	Energia elétrica (kW)	5,97
	Tempo necessário para finishing (h)	6
Centrífuga	Energia elétrica (kW)	7,46
	Tempo necessário (h)	6
	Fração mássica de água no suco (kg/kg)	0,96
	Temperatura ambiente (K)	298
	Temperatura do suco na entrada (K)	298
	Temperatura do suco na saída (K)	310
	Densidade do suco (kg/l)	1,018
Pasteurização	Energia elétrica (kW)	15,01
	Tempo necessário para pasteurizar (h)	6
	Massa de vapor necessária (kg/h)	4500
	Fração mássica de água no suco (kg/kg)	0,96
	Temperatura de vapor na entrada (K)	453
	Temperatura ambiente (K)	298
	Temperatura do suco na entrada (K)	310
	Temperatura do suco na saída (K)	371
	Densidade do suco (kg/l)	1,018

Embalagem	Energia elétrica (kW)	65,42
	Tempo necessário para limpeza (h)	6
	Número de pessoas envolvidas na embalagem	35
	Temperatura ambiente (K)	298
	Temperatura do suco na entrada (K)	371
	Temperatura do suco na saída (K)	311

**Fonte:** Adaptado de M. A. Waheed (2007)

### 3.1.1 Método de cálculo da energia elétrica teórica

O uso de energia elétrica por equipamento foi obtido pelo produto da potência nominal do motor e o número de horas de operação, considerando uma eficiência de 80%. M. A. Waheed (2007)

$$E_p = \eta Pt \quad (1)$$

Onde  $E_p$  é a energia elétrica consumida em kWh,  $P$  é a potência nominal em kW,  $t$  é o tempo em horas e  $\eta$  a eficiência.

### 3.1.2 Método de cálculo da energia braçal teórica

O uso de energia braçal foi estimado de acordo com o recomendado por Odigboh (1997), onde o consumo de energia de um trabalhador humano normal em climas tropicais é de 0,075 kW podendo ser sustentada de 8 a 10 horas. A taxa máxima é dada por 0,30 kW numa eficiência de 25%.

Portanto a energia calculada é dada por:

$$E_b = 0,075 Nt \quad (2)$$

Onde  $N$  é o número de pessoas e  $t$  é o tempo útil gasto na realização da tarefa em horas.

### 3.1.3 Método de cálculo da energia térmica teórica



A energia térmica derivou do uso de gás natural como combustível no motor à combustão para geração de energia elétrica e para a caldeira. Sendo assim esse consumo foi estimado multiplicando a quantidade de combustível pelo poder calorífico correspondente.

$$E_t = C_f W \quad (3)$$

Onde  $E_t$  é o consumo de energia térmica (J),  $C_f$  é o poder calorífico do combustível (J/l) e  $W$  é a quantidade de combustível em (l)

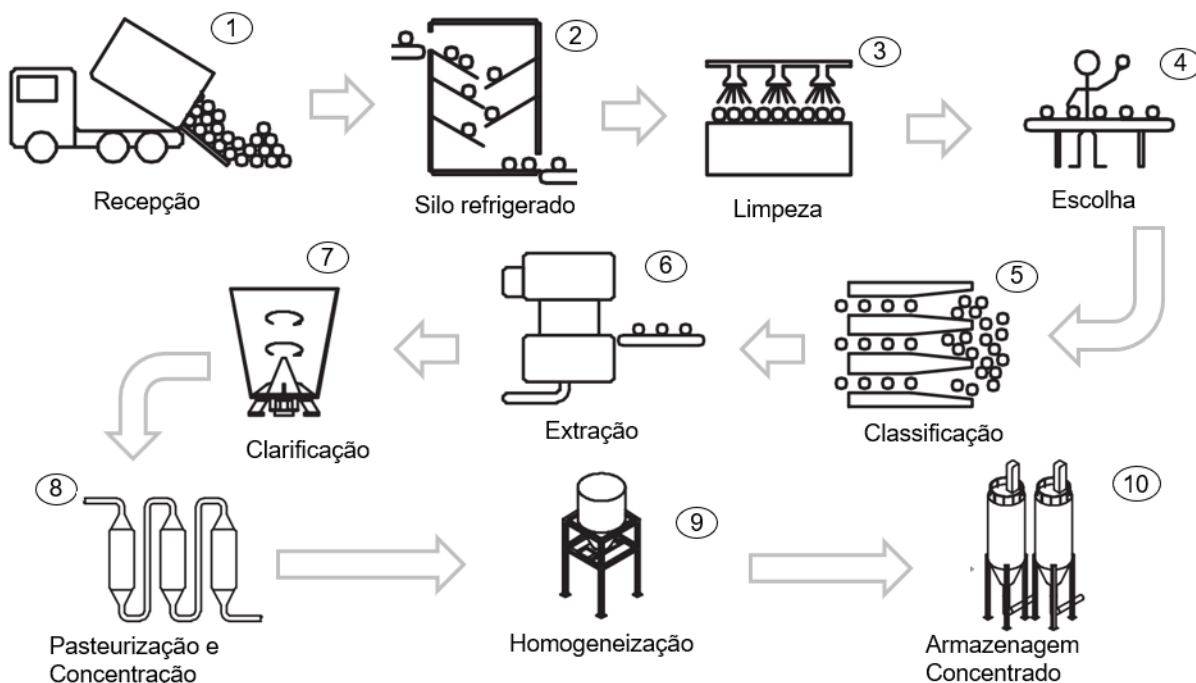
### 3.2 Processamento do suco concentrado

Para a análise energética desse processo foi escolhido um estudo de uma unidade industrial de suco de laranja concentrado congelado localizada na cidade de Pinhalzinho, Santa Catarina. Nela, sete etapas principais foram escolhidas para contabilização energética sendo que essa contabilização foi determinada de acordo com as especificações das fichas técnicas de cada equipamento para estimar o consumo de energia elétrica.

O processo completo conta com dez operações como mostrado na Figura 3.2 e podem ser assim detalhadas: inicialmente, na etapa de recepção (1), as frutas à granel são transportadas através de caminhões que são pesados utilizando balanças rodoviárias, onde a massa das laranjas é determinada pela diferença das pesagens com o caminhão abastecido e vazio. Após a pesagem as laranjas são estocadas em silos refrigerados (2) através de rampas hidráulicas, onde ocorre a descarga. Para o processamento as frutas são descarregadas por gravidade e transportadas por esteiras contendo a lavadora (3), onde são removidas impurezas da casca e onde é feita a seleção manual facilitada por roletes (4) e antes de ir para extratora os frutos passam por uma classificação automática e contínua por tamanho (5), esta etapa tem como finalidade preparar a alimentação nas máquinas de extração que são ajustadas para um tamanho específico, proporcionando uma maior eficiência e qualidade do produto. A extração

ocorre por cinco extratoras FMC (6) com cinco copos cada uma, durante a etapa de extração as células de óleo da casca são liberadas e uma emulsão de óleo passa a cobrir totalmente a superfície dos sólidos que compõem a fruta, esse óleo é arrastado através de jatos de água juntamente com partes da casca, formando uma suspensão que é utilizada na linha de extração de óleo e remove componentes que podem causar amargor. O suco segue, então, para turbo filtros (7) que separam a polpa que passará pela etapa de recuperação do suco (“*Pulp wash*”), onde ela será misturada com condensado vegetal proveniente dos evaporadores para um segundo turbo filtro para ser misturado com o suco da primeira filtração e segue para o evaporador TASTE para pasteurização e concentração (8) onde será concentrado de 9,0 °Brix à 65 °Brix, sendo a etapa mais significativa para obtenção do suco concentrado e onde há maior consumo de energia no processo. O suco concentrado segue para uma etapa de homogeneização (9) onde será resfriado e por fim para o envase em tambores metálicos para estocagem (10) a uma temperatura média de -20 °C.

**Figura 3.2 – Processo completo de produção de suco concentrado**



**Fonte:** Adaptado de J. Peter Clark (2009)

**Tabela 3.2 – Operações utilizadas para contabilização de energia**

Recepção	Energia elétrica (kW)	6,71
	Tempo necessário para recepção (h)	13
Limpeza	Energia elétrica (kW)	4,67
	Tempo necessário para limpeza (h)	20,2
Extração	Energia elétrica (kW)	52,94
	Tempo necessário para extração (h)	20,2
Finishing	Energia elétrica (kW)	7,75
	Tempo necessário para separação (h)	20,2
	Concentração de sólidos solúveis (°Brix)	9,76
Evaporação	Energia elétrica (kW)	108,03
	Tempo necessário para finishing (h)	24
	Concentração de sólidos solúveis (°Brix)	64,68
Congelamento	Energia elétrica (kW)	4,97
	Tempo necessário (h)	24
	Concentração de sólidos solúveis (°Brix)	64,68
Estocagem	Energia elétrica (kW)	112,5
	Tempo necessário (h)	24

**Fonte:** Adaptado de Gilson J. Rodrigues (2001)

### 3.2.1 Método de cálculo da energia elétrica

O consumo de energia elétrica total foi obtido somando os consumos obtidos em todas as etapas pelo período estabelecido.

### 3.2.2 Método de cálculo da energia térmica

O consumo de energia térmica total foi determinado através da quantidade de lenha necessária para produzir 1000 kg de vapor, levando em consideração a eficiência da caldeira e o consumo de vapor pelo evaporado.

- 1) Massa específica da lenha =  $\rho_L$  kg/m<sup>3</sup>
- 2) Quantidade de lenha a produzir 1000 kg de vapor =  $m_L$  kg
- 3) Eficiência da caldeira =  $\eta_C$ %
- 4) Entalpia  $\Delta H = H_g - H_i$  (kJ/kg)
- 5) Total de lenha consumida no período =  $V_L$  m<sup>3</sup>
- 6) Consumo de vapor pelo evaporado = 84 % do produzido pela caldeira.

Total de energia térmica consumida no evaporador ( $E_T$ ) em kJ

$$E_T = V_L \cdot \rho_L \cdot \frac{1000}{m_L} \cdot \eta_C \cdot 0,84 \cdot \Delta H \quad (4)$$

### 3.3 Análise energética dos processos

Para a análise energética dos processos foi necessário estabelecer um padrão que possibilitasse a comparação entre os dois tipos de processamento de suco, para isso foi utilizado a quantidade de laranjas utilizada na menor fábrica. Portanto foi considerado que cada fábrica processou 10 toneladas de laranja, não sendo necessário adequar os consumos energéticos para a fábrica de suco integral. Já para a fábrica de suco concentrado foi processado no período estabelecido cerca de 8398 toneladas de laranja e, portanto, uma relação direta foi feita para estimar o consumo de 10 toneladas.

O estudo do processo de produção de suco integral foi feito tendo como combustível o diesel, seu consumo foi medido tanto para o gerador quanto para o uso na caldeira e é respectivamente de 18,967 e 10,323 L para o processamento de 10 toneladas de laranja. Para adequar a realidade brasileira foi optado o uso de gás natural para a comparação com bagaço de cana, portanto o consumo de gás natural foi estimado através de uma relação direta usando o poder calorífico e o consumo energético da planta, em volume.

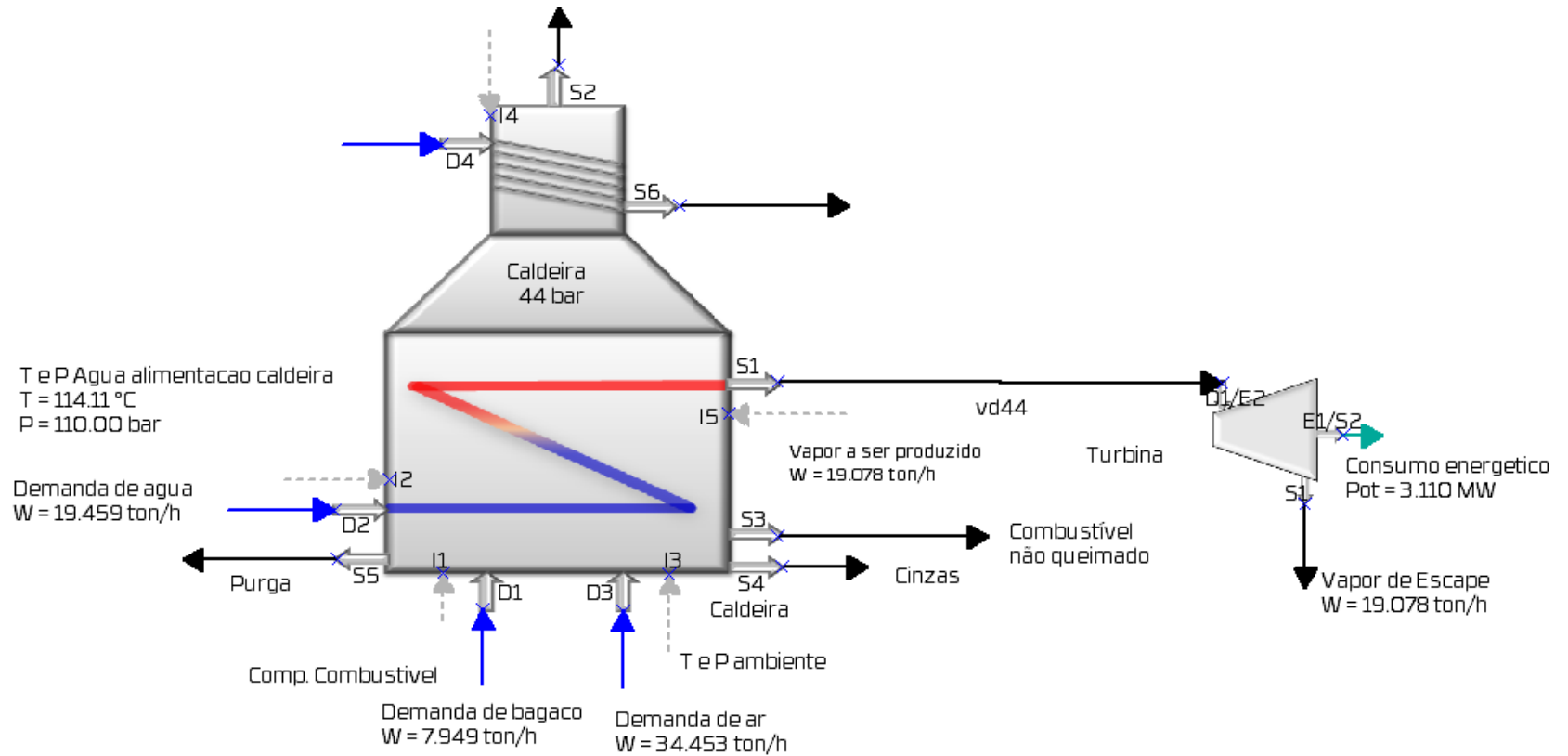
$$V = \frac{PCS}{E} \quad (4)$$

Já para o estudo do processo de produção de suco concentrado o combustível usado foi lenha, sendo adaptado ao cavaco de forma semelhante, em massa.

$$M = \frac{PCS}{E} \quad (5)$$

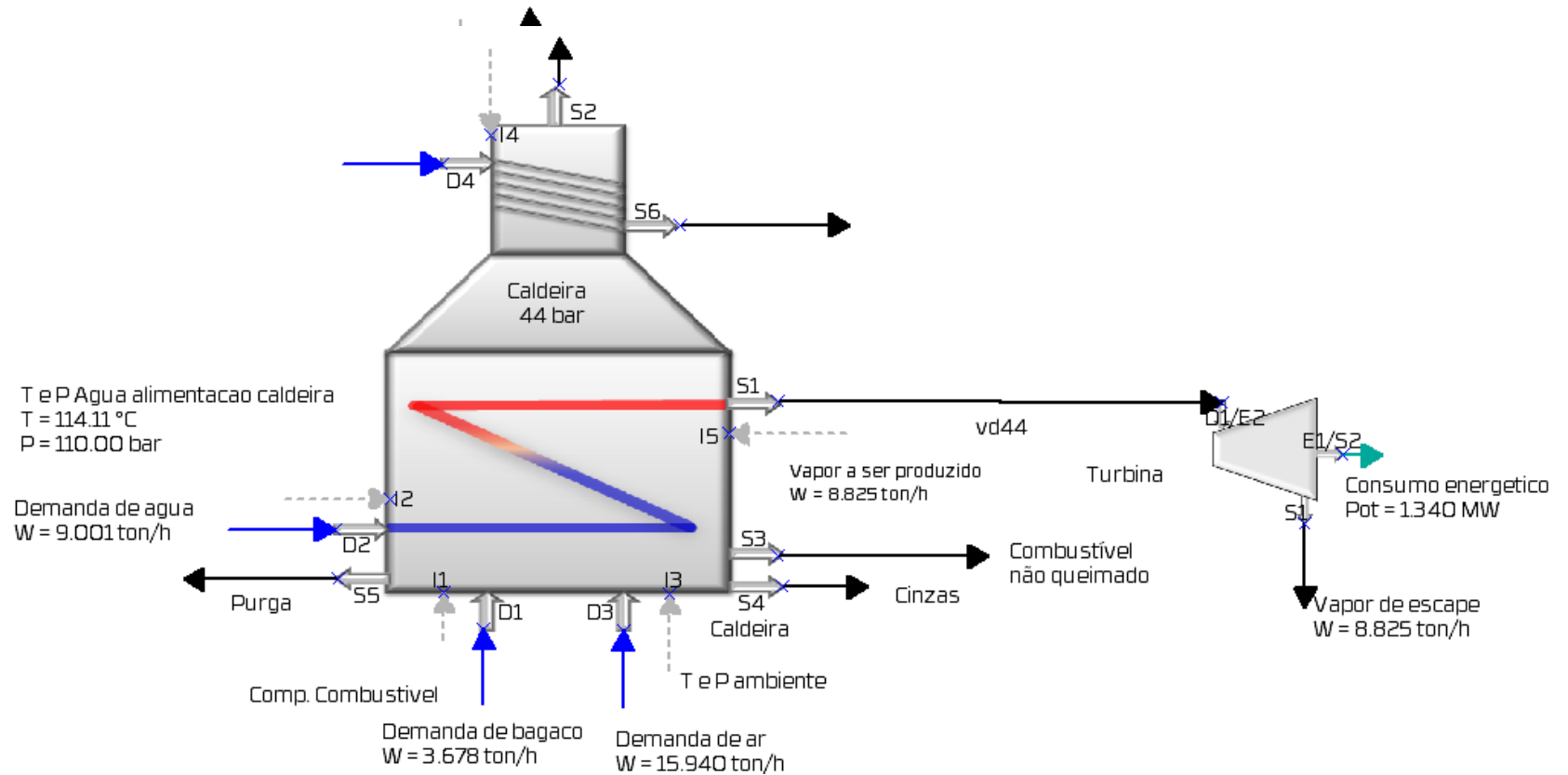
Para a estimativa de quantidade de bagaço necessário para gerar energia suficiente para suprir cada processo foi utilizado o Simulador Pentagro®. Simulando uma caldeira e uma turbina conforme as Figuras 3.1 e 3.2. para cada um dos processos.

**Figura 3.3 - Simulação para demanda de bagaço – suco integral**



**Fonte:** Acervo pessoal

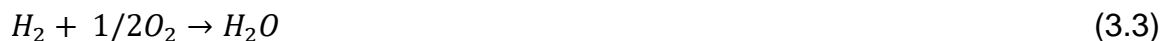
**Figura 3.4 - Simulação para demanda de bagaço – suco concentrado**



**Fonte:** Acervo pessoal

O simulador Pentagro trabalha de forma modular sequencial para processos contínuos com fluxo definido no tempo. A simulação contou com os parâmetros de entrada mais comum nesse segmento e são listados a seguir: classe de pressão na caldeira de 44 bar e temperatura 450 °C, PCS do bagaço – base seca 18000 kJ/kg e uma produção específica de vapor por combustível de 2,4 kg/kg. As demandas de água, bagaço e ar são parâmetros calculados pela simulação em função da quantidade de vapor necessária para operação e este, por consequência, foi calculado numa turbina de contrapressão (turbogerador) de acordo com a demanda de energia necessária para suprir o processo.

O balanço de massa na caldeira é derivado das relações estequiométricas da combustão do bagaço representado pelas reações químicas abaixo (Hugot, 1969):



A concentração de CO nos gases de escape é um dado de entrada em *ppm* e foi fixado em 400 como um dado padrão.

### 3.4 Análise ambiental

A análise ambiental desse processo foi realizada utilizando dados da literatura presentes em dois estudos distintos, onde através da metodologia de Análise do Ciclo de Vida (*Life Cycle Analysis – LCA*) a pegada de carbono dos três combustíveis envolvidos no processo foi obtida para fins comparativos. Para o gás natural e o cavaco de eucalipto foi utilizado um relatório realizado em 2021 pela Biomass Thermal Energy Council (BTEC) e para o bagaço de cana um artigo escrito por M. Carvalho et al (2019).



## 4 Resultados e Discussão

A análise realizada conta com uma comparação direta entre o custo relativo total em R\$/kwh para cada um dos processos, com a finalidade de averiguar, do ponto de vista econômico, quais os melhores combustíveis dentre os citados, já do ponto de vista ambiental buscou-se na literatura dados referentes à quantidade de gases do efeito estufa liberados para gerar uma certa quantidade de energia, a fim de compará-los. Deve-se levar em consideração que os combustíveis escolhidos para a análise, em comparação com os combustíveis utilizados nos trabalhos usados como referência, já são os mais interessantes do ponto de vista ecológico e que apresentam o menor custo para o processo.

### 4.1 Consumo energético dos processos

Para obtenção dos resultados o cálculo do consumo de energia elétrica e térmica reais utilizada na produção do suco integral foi feito utilizando o consumo de combustível que alimentou o gerador, que gerou 9059,4 MJ e a caldeira, que gerou 2071,260 MJ no período de processamento de 20 dias para 10 toneladas de laranja. O consumo total de energia, considerando o valor calculado teórico de energia braçal foi de 11196,46 MJ como pode ser observado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Consumo energético para produção de suco integral**

Energia Elétrica (kJ)	Energia Térmica (kJ)	Energia Manual (kJ)	Total de Energia (kJ)
2.072.260	9.059.400	64.800	11.196.460

**Fonte:** Acervo pessoal

Já para o processamento do suco concentrado foi acompanhado o período de 30 dias. Parte da energia elétrica também foi destinada para iluminação da planta e a potência utilizada no período foi de 49,52 kW. Somando o consumo de energia elétrica total das etapas envolvidas no período estabelecido houve um consumo de  $1041,398 \cdot 10^3$  MJ e um consumo de  $3011,136 \cdot 10^3$  MJ de energia térmica no período estabelecido. Como citado no capítulo anterior, o estudo foi normalizado para o processamento de 10 toneladas de laranja, portanto o consumo de energia elétrica foi de 1233,883 MJ e o consumo de energia térmica 3567,696 MJ, resultando num total de 4801,580 MJ, como pode ser observado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Consumo energético para produção de suco concentrado**

Energia Elétrica (kJ)	Energia Térmica (kJ)	Energia Manual (kJ)	Total de Energia (kJ)
1.233.883,89	3.567.696,68	-	4.801.580,57

**Fonte:** Acervo pessoal

É possível notar que o processo para suco integral exige um maior consumo de energia de uma forma geral, especialmente térmica, uma razão para isso se dá em uma peculiaridade da fábrica em estudo, pois o pasteurizador possui uma grande ineficiência, a causa disso é o uso apenas de vapor para o aquecimento do suco, sendo necessária uma integração energética. Além disso a fábrica de suco concentrado possui uma maior eficiência energética do evaporador TASTE e uma melhor integração energética. Além disso, vale ressaltar que o volume de suco a ser pasteurizado é maior do que o suco concentrado, uma vez que a pasteurização no evaporador TASTE ocorre após um ou dois estágios, sendo assim há um consumo maior de vapor na produção do suco integral.

## **4.2 Consumo de combustível**

Além de um preço vantajoso de 4,53 R\$/m<sup>3</sup> (COMGAS, 2022) em comparação com outros combustíveis do mercado, o gás natural tem uma vantagem de transporte

através de tubulações, o que facilita seu uso. A Tabela 4.3 apresenta os dados que foram levados em consideração para comparação econômica para o gás natural.

**Tabela 4.3 – Consumo de gás natural**

Poder calorífico superior gás natural (kJ/m <sup>3</sup> )	9.500
Preço do gás natural industrial (R\$/m <sup>3</sup> )	4,53
Consumo de gás natural (m <sup>3</sup> )	281,69
Custo total de combustível (R\$)	1276
Custo relativo total (R\$/kwh)	0,41

**Fonte:** Acervo pessoal

Dentre os combustíveis analisados, o cavaco de eucalipto é o que tem o maior preço no mercado, com valor de 46,02 R\$/m<sup>3</sup> (EMBRAPA, 2018) se destaca por ter um aproveitamento melhor do que a lenha, uma vez que seu tratamento envolve partes da árvore que geralmente não são aproveitadas (P.S. Neiva, 2018). A Tabela 4.4 apresenta os dados que foram levados em consideração para comparação econômica para o cavaco.

**Tabela 4.4 – Consumo de cavaco**

Poder calorífico superior cavaco (kJ/kg)	19.170
Preço do cavaco (R\$/m <sup>3</sup> )	46,02
Consumo de cavaco (m <sup>3</sup> )	1,63
Custo total de combustível (R\$)	75,01
Custo relativo total (R\$/kwh)	0,056

**Fonte:** Acervo pessoal

Devido à alta oferta de bagaço de cana proveniente das usinas sucroalcooleiras do interior de São Paulo, este acaba por ter um preço bem menor que os demais combustíveis, no valor de 0,025 R\$/kg (Udop, 2016). O consumo de bagaço simulado resultou em 7.949 kg para a produção de suco integral e 3.678 kg para produção de suco

concentrado. As Tabela 4.5 e 4.6 apresentam os dados que foram levados em consideração para comparação econômica para o bagaço em ambos os processos.

**Tabela 4.5 – Consumo de bagaço de cana – suco integral**

Poder calorífico superior bagaço (kJkg <sup>3</sup> )	18.000
Preço do bagaço (R\$/kg)	0,025
Consumo de bagaço (kg)	7.949
Custo total de combustível (R\$)	198,73
Custo relativo total (R\$/kwh)	0,064

**Fonte:** Acervo pessoal

**Tabela 4.6 – Consumo de bagaço de cana – suco concentrado**

Poder calorífico superior bagaço (kJ/kg)	18.000
Preço do bagaço (R\$/kg)	0,025
Consumo de bagaço (kg)	3.678
Custo total de combustível (R\$)	91,95
Custo relativo total (R\$/kwh)	0,069

**Fonte:** Acervo pessoal

### 4.3 Análise econômica

Como é possível observar pela Tabela 4.7 e pelo gráfico na Figura 4.1 o bagaço teve uma relevante vantagem econômica, em reais por kwh, para suprir a produção em relação ao gás natural, uma vez que o custo para o bagaço representa cerca de 19,5% do custo para o gás natural.

No entanto, na comparação com o cavaco de eucalipto essa vantagem não é tão clara. Razões para isso envolvem a instabilidade do preço do bagaço, a depender do momento da safra, a falta de unidade na precificação do cavaco, uma vez que o preço

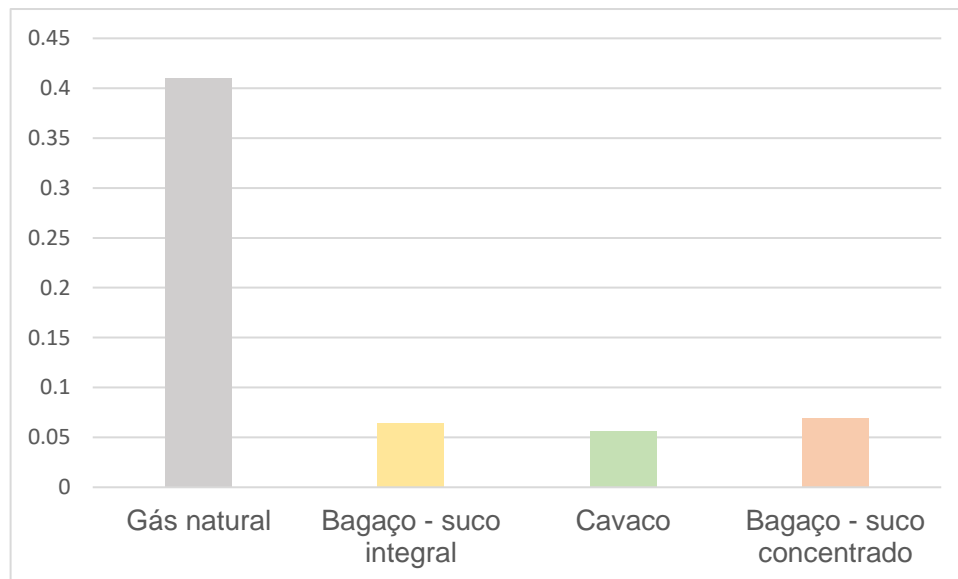
foi determinado através de um estudo feito pela EMBRAPA (2018) no estado do Goiás, onde o preço pode diferir daquele encontrado no estado de São Paulo e esse estudo a considera um preço mínimo para o lucro do produtor, sem considerar os custos de transporte para cada um dos combustíveis.

**Tabela 4.7 – Custos relativos dos combustíveis**

Custo relativo total gás natural (R\$/kwh)	0,410
Custo relativo total cavaco (R\$/kwh)	0,056
Custo relativo total bagaço – suco integral (R\$/kwh)	0,064
Custo relativo total bagaço – suco concentrado (R\$/kwh)	0,069

**Fonte:** Acervo pessoal

**Figura 4.1 – Comparação entre os combustíveis empregados**



**Fonte:** Acervo pessoal (2022)

Vale ressaltar que em estudos que levam em consideração análises energéticas há um propósito duplo, além de considerar uma redução no custo para o processo,

considerar a conservação do meio ambiente. Portanto, há mais um motivo para escolha dos combustíveis renováveis presentes neste trabalho.

#### 4.4 Análise econômica – Safra 2021/22

Utilizando os dados fornecidos por cada um dos trabalhos usados como referência é possível realizar uma análise tendo como base os processos aqui apresentados e assumindo que todo suco produzido em uma safra advém de fábricas com os mesmos consumos energéticos, ou seja, caso todas as fábricas que produzem suco integral tivesse consumo energético semelhante à fábrica analisada nesse trabalho estimar qual seria o custo total de cada um dos combustíveis no país, afim de observar o impacto econômico decorrente da escolha de combustível utilizado. A Tabela 4.8 fornece os dados de energia necessária para o processamento do suco integral da safra em comparação com os dados fornecidos.

**Tabela 4.8 – Consumo energético para produção de suco integral – Safra 2021/22**

Laranjas processadas (ton)	Suco produzido (ton)	Energia necessária (GJ)	Energia necessária (kwh)
10	7,74	11,2	3.110
347.790	269.081	389.402	108.166,66

**Fonte:** Acervo pessoal

Essas informações nos permitem calcular a quantidade de combustível necessária para o processamento de 347.790 toneladas de laranja da safra de 2021/22 através de uma relação direta para o gás natural e utilizando o simulador para o bagaço. A Tabela 4.9 fornece a quantidade de combustível necessária assim como o seu custo.

**Tabela 4.9 – Volume de combustível e custos para produção de suco integral – Safra 2021/22**

Gás natural (m³)	Custo (R\$)	Bagaço (ton)	Custo (R\$)
281,69	1.276	7,949	198,73
9.796.900	44.379.395,16	276,205	6.911.456,78

**Fonte:** Acervo pessoal

O mesmo pode ser feito para o suco concentrado. A Tabela 4.10 apresenta os dados de energia necessária para o processamento do suco concentrado da safra em comparação com os dados fornecidos.

**Tabela 4.10 – Consumo energético para produção de suco concentrado – Safra 2021/22**

Laranjas processadas (ton)	Suco produzido (ton)	Energia necessária (GJ)	Energia necessária (kwh)
8440	728,75	4.052,53	1.125,56
8.451.222,45	729.719	4.057.922,55	1.127.052

**Fonte:** Acervo pessoal

Essas informações permitem calcular a quantidade de combustível necessária para o processamento de 8.451.223 toneladas de laranja da safra de 2021/22 através de uma relação direta para o cavaco e utilizando o simulador para o bagaço. A Tabela 4.11 fornece a quantidade de combustível necessária assim como o seu custo.

**Tabela 4.11 – Volume de combustível e custos para produção de suco concentrado – Safra 2021/22**

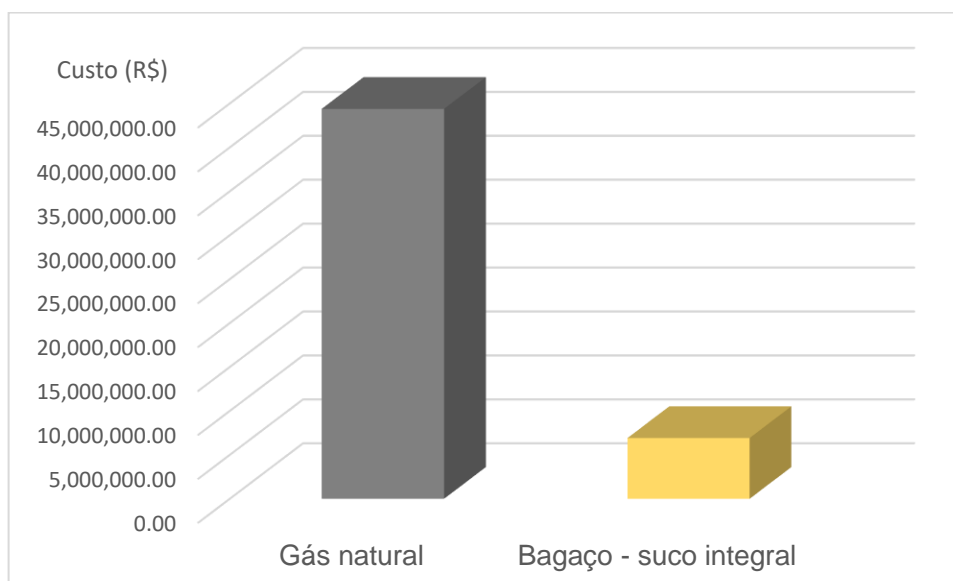
Cavaco (m³)	Custo (R\$)	Bagaço (ton)	Custo (R\$)
1,63	75,01	3,678	198,73

1.632,17	75.112,34	3.414,419	85.360,48
----------	-----------	-----------	-----------

**Fonte:** Acervo pessoal

É possível notar que para o caso de uma fábrica que emprega o gás natural em seu processo haveria uma economia de aproximadamente 84,43% no emprego do bagaço. O uso do cavaco aparenta ser mais vantajosa em relação ao bagaço, com uma economia de aproximadamente 12%. Os gráficos apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 representam essa economia.

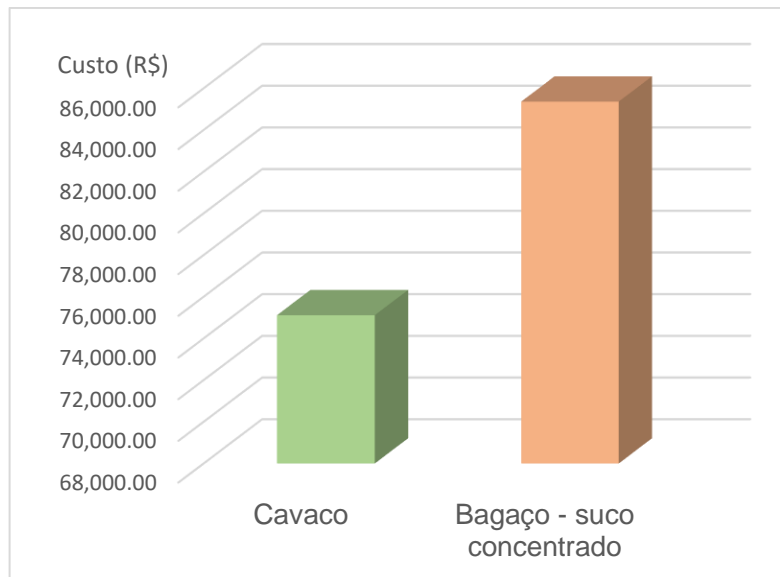
**Figura 4.2 – Comparação safra 2021/22 para o suco integral**



**Fonte:** Acervo pessoal (2022)

**Figura 4.3 – Comparação safra 2021/22 para o suco concentrado**





**Fonte:** Acervo pessoal (2022)

#### 4.5 Análise ambiental

A Tabela 4.12 apresenta a pegada de carbono, que é o total de gases do efeito estufa emitidos por todo o ciclo de vida de um produto ou processo para geração de uma certa quantidade de energia, em kgCO<sub>2</sub>e/kwh.

**Tabela 4.12 – Pegada de carbono por combustível empregado.**

Pegada de Carbono – Cavaco (kgCO <sub>2</sub> e/kwh)	0,0252
Pegada de Carbono – Bagaço (kgCO <sub>2</sub> e/kwh)	0,2270
Pegada de Carbono – Gás Natural (kgCO <sub>2</sub> e/kwh)	0,2480

**Fonte:** Adaptado de BTEC (2021) e M. Carvalho et al. (2019)

Por meio dos dados é possível notar que o gás natural apresenta a maior quantidade de gases emitidos, isso se deve ao fato de ser um combustível fóssil, tendo um balanço líquido de carbono positivo na atmosfera. Já a grande diferença entre o bagaço e o cavaco pode ser explicada pela forma como os dados foram obtidos, no

estudo feito por BTEC (2021) a emissão considera apenas a queima do cavaco, sem ponderar a emissão causada pelo transporte do combustível.

Por fim, é possível concluir que a substituição do gás natural por bagaço não só é economicamente viável como apresenta claras evidências de redução de impacto ambiental na emissão de gases do efeito estufa, havendo duas razões para sua utilização como combustível nesses processos. No entanto, embora através dos resultados pouco se possa concluir na comparação econômica entre bagaço e cavaco, é evidente que ambos têm impacto ambiental reduzido se comparados ao combustível fóssil de menor impacto, sendo a substituição ambientalmente recomendável.

## 5 Conclusões e recomendações

### 5.1 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo concluir, por meio da metodologia aplicada, que a substituição de bagaço por outros combustíveis para os processos de fabricação de suco de laranja integral e concentrado é econômica e ambientalmente viável. Para este fim, conclui-se que a substituição por gás natural é viável economicamente, havendo uma economia de 0,346 R\$/kwh, sendo 84,43% a menos com o emprego do bagaço, e ambientalmente há uma redução de 0,021 kgCO<sub>2e</sub>/kwh na emissão de gases do efeito estufa. No entanto, essa substituição não é clara do ponto de vista econômico na comparação com o cavaco de eucalipto, onde a diferença no preço seria por volta de 0,013 R\$/kwh com 12% de economia em favor do cavaco.

Vale ressaltar que a análise econômica para o cavaco sofre por conta da dificuldade em encontrar dados na literatura com preços comerciais para o cavaco, o preço utilizado nesse estudo leva em consideração o lucro mínimo do produtor em relatório feito pela EMBRAPA (2018).

### 5.2 Recomendações

Em relação ao caráter ambiental da análise, não foi possível traçar algum paralelo com o impacto causado pelo emprego do cavaco e do bagaço com a literatura disponível. Além de não haver conclusão com a utilização do *software Waste Reduction (WAR) algorithm* para combustíveis renováveis. Neste panorama, é sugerido:

- Utilização de um caso prático para consumos energéticos em cada um dos processos aqui demonstrados.
- Obtenção de preços próximo a realidade para o cavaco.

- Análise ambiental completa para combustíveis renováveis, levando ou não em consideração o impacto causado pelo transporte.
- Complementação nos resultados obtidos em processos realizados pelo *software Waste Reduction (WAR) algorithm* para utilização de combustíveis renováveis.

## Referências Bibliográficas

AKYILDIZ A., Ağçam E. Citrus Juices Technology. In: Malik A., Erginkaya Z., Ahmad S., Erten H. Food Processing: Strategies for Quality Assessment. Food Engineering Series. Springer, New York, NY. 2014

ANGELETTI, S., Moresi, M. **Modelling of multiple-effect falling-film evaporators.** **Journal of Food Technology.** 1983. p. 539–563.

BARBIERI, J. C. Gestão Ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. Saraiva. São Paulo. 2016. p. 200.

BNDES. **Gás para o desenvolvimento: perspectivas de oferta e demanda no mercado de gás natural do Brasil.** 2021. p. 40.

BRAZILIAN JOURNAL OF WOOD SCIENCE. **Cavacos e partículas de madeira – concentração mundial de mercado e contribuição para a balança comercial brasileira.** 2017. p. 74-85.

BROWN. **Model 720, 620, 520, 570 CITRUS JUICE EXTRACTOR.** Brown International Corporation, LLC. 2018.

BTEC. **Life Cycle Analysis of Renewable Fuel Standard Implementation for Thermal Pathways for Wood Pellets and Chips.** 2021. p. 21-49.

CITRUSBR. **Exportações brasileiras de suco de laranja – Mundo.** Disponível em <https://citrusbr.com/estatisticas/exportacoes/>. Acesso em: 06 de março de 2022.

COOK MACHINERY COMPANY, LLC. **Juice Evaporators, Principles Of Operation And Troubleshooting.** Disponível em [JUICE EVAPORATORS, PRINCIPLES OF](#)

[OPERATION AND TROUBLESHOOTING \(cookmachineryllc.com\)](https://www.cookmachineryllc.com). Acesso em 20 de janeiro de 2022.

EIA. **Biomass explained**. Disponível em <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>. Acesso em 12 de março de 2022.

EMBRAPA. **Análise de viabilidade econômica da produção de eucalipto para energia em Rio Verde, GO**. 2018. p. 25-28.

EMBRAPA. **Estágio de maturação ideal laranjas e tangerinas**. Disponível em <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Citros/CitrosNordeste/colheita.htm>. Acesso em 15 de janeiro de 2022.

ESTADÃO. **A história da laranja no Brasil**. Disponível em <https://summitagro.estadao.com.br/historia-da-laranja/>. Acesso em: 04 de março de 2022.

GIL, I.A., Gil, M.I., Ferreres, F. Effect of processing techniques at industrial scale on orange juice antioxidant and beneficial health compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. p. 5107-5114.

HEIJUNGS, R., Huppés, G., Lankreijer, R.M., Udo de Hayes, H.A., & Wegenersleeswijk, A. **Environmental Life Cycle Assessment of Products Guide**. Leiden: Centre of Environmental Science. 1992.

HUGOT, E. Manual da engenharia açucareira. Volume I. Editora Mestre Jou. São Paulo. 1969.

MIN, S., Jin, Z.T., Min, S.K., Yeom, H. and Zhang, Q.H. Commercial-scale pulsed electric field processing of orange juice. *Journal of Food Science*. 2003. p. 1265–1271.

MONCEAUX, D., Kuehner, D. **Dryhouse technologies and DDGS production**. 2009.

NARAYANAMURTHY, V., Sarma, P.K. **Falling film evaporators—A design equation for heat transfer rate.** *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1977. p. 732–735.

NEIVA, P.S., D. B. Furtado, J. R. D. Finzer. **CAPACIDADE TÉRMICA E PODER CALORÍFICO DE BIOMASSA EUCALIPTO.** Universidade de Uberaba. 2018.

Peter Clark, J. *Practical Design, Construction and Operation of Food Facilities.* Elsevier Inc. 2009. p. 93.

ONS. **Plano anual da operação eletroenergética dos sistemas isolados para 2022.** Disponível em <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/ONS-divulga-Plano-Anual-da-Operacao-Eletroenergetica-dos-Sistemas-Isolados-para-2022.aspx>. Acesso em 13 de março de 2022.

SANDHU, K. S. Orange and Citrus Juices. In: *HANDBOOK OF FRUITS AND FRUIT PROCESSING.* Y. H. HUI. Blackwell Publishing, 2006. p. 311-336.

SCHMIDT, R.H., Sim, C.A., Parish, M.E., Pao, S. and Ismail, M.A. A model HACCP plan for small-scale, fresh-squeezed (non-pasteurized) citrus juice operations. University of Florida Cooperative Extension Service Circular No. 1179. Gainesville, Florida. 1997.

SENAI. Departamento Nacional. *Tecnologia de alimentos: processamento de sucos e purês de frutas.* Rio de Janeiro: SENAI, 1991. p. 42.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. **Exportações de suco de laranja safra 2018/19.** Disponível em <https://www.sna.agr.br/>. Acesso em: 13 de janeiro de 2022.

STATISTA. **Leading Orange juice exporting countries worldwide in 2020.** Disponível em <https://www.statista.com/statistics/1147551/main-export-countries-for-orange-juice-worldwide/>. Acesso em: 11 de março de 2022.

TETRAPAK. **Orange Book.** Disponível em <https://orangebook.tetrapak.com/chapter/fruit-processing>. Acesso em: 17 de janeiro de 2022.

UDOP. **Há um ano, bagaço de cana era vendido por R\$150,00 a tonelada, agora chega a R\$25,00.** Disponível em <https://www.udop.com.br/noticia/2016/>. Acesso em 24 de janeiro de 2022.

UELGEN, N., Oezilgen, M. Determination of optimum pH and temperature for pasteurization of citrus juices by response surface methodology. Zeitschrift fuer Lebensmittel Untersuchung und Forschung. 1993.

UNICA. **A BIOELETRICIDADE GERADA A PARTIR DA CANA-DE-AÇÚCAR É A 4ª FONTE MAIS IMPORTANTE DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.** Disponível em <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>. Acesso em 15 de março de 2022.

USDA. **Citrus: World Markets and Trade.** Foreign Agricultural Service. 2022.

WICKER, Louise. Frozen Citrus Juices. In: HANDBOOK OF FROZEN FOODS. University of Georgia, USA. Marcel Dekker, 2004. p. 479-484.

YOUNG D., Scharp R., Cabezas H. **The waste reduction (WAR) algorithm: environmental impacts, energy consumption, and engineering economics.** 2000. p. 605-615.

WAHEED, M. A., S. O. Jekayinfa, J. O. Ojediran, O.E. Imeokparia. **Energetic analysis of fruit juice processing operations in Nigeria.** 2007.



## Apêndice A

### Cálculo da energia térmica suco de laranja concentrado

Para o cálculo em kJ de energia térmica consumida no processo durante o período estabelecido foram utilizados os seguintes dados:

- 7) Massa específica da lenha =  $450 \text{ kg/m}^3$
- 8) Quantidade de lenha a produzir 1000 kg de vapor = 320 kg
- 9) Eficiência da caldeira = 82,50 %
- 10)  $A H = H_g - H_i = 2255,35 \text{ kJ/kg}$
- 11) Total de lenha consumida no mês de agosto = 1.370 m<sup>3</sup>
- 12) Consumo de vapor pelo evaporado = 84 % do produzido pela caldeira.

a) total de lenha consumida =  $1370 \text{ m}^3 \cdot 450 \text{ kg / m}^3 = 616.500 \text{ kg}$

b) total de vapor gerado teórico =  $616.500 \text{ kg} \cdot 1000 \text{ kg / 320 kg} = 1.926.562 \text{ kg}$

c) total de vapor gerado =  $1.926.562 \text{ kg} \cdot 0,825 = 1.589.414 \text{ kg}$

d) total de vapor consumido pelo evaporador =  $1.589.414 \text{ kg} \cdot 0,84 = 1.335.108 \text{ kg}$

e) total de energia térmica consumida no evaporador =  $1.335108 \text{ kg} \cdot 2255,35 \text{ kJ/kg}$   
 $= 3.011,136 \cdot 10^6 \text{ kJ}$