



**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL  
DE ETANOL E AÇÚCAR**

**Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A**

**Frederico Sampaio Vasconcelos Vilela**

Orientadora: Sandra Maria da Luz

Co-orientador: Armando de Azevedo Caldeira Pires

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PUBLICAÇÃO: ENM.DM-184A/2013**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE ETANOL  
E AÇÚCAR

Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A

FREDERICO SAMPAIO VASCONCELOS VILELA

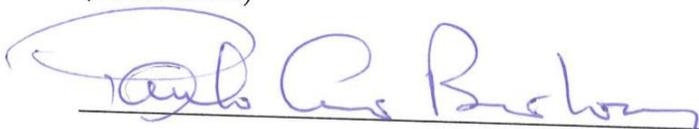
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:



Prof<sup>ª</sup> Sandra Maria da Luz, Dr<sup>ª</sup>. (FGA-UnB)

(Orientadora)



Paulo Cesar de Campos Barbosa, Dr. (Petrobras Biocombustível)

(Examinador Externo)



Prof<sup>ª</sup> Andrea Cristina dos Santos, Dr<sup>ª</sup>. (ENP-UnB)

(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 11 DE ABRIL DE 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

VILELA, FREDERICO SAMPAIO VASCONCELOS

Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A [Distrito Federal] 2013. xiv, 93p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Avaliação do Ciclo de Vida

2. Açúcar e etanol

3. Desempenho ambiental

4. Inventário de ciclo de vida

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VILELA, F. S. V. (2013) Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM-184A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Frederico Sampaio Vasconcelos Vilela.

TÍTULO: Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Frederico Sampaio Vasconcelos Vilela  
SQN 407 Bloco G Apto 105, Asa Norte.  
70.855-070 Brasília – DF– Brasil.  
vilelafrederico@yahoo.com.br

*À minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Meus agradecimentos são para todas as pessoas que contribuíram de alguma forma com meu aprendizado e experiência profissional. Em especial agradeço aos professores e orientadores Sandra e Armando pelas oportunidades e confiança em meu trabalho, e também para os profissionais da Usina Jalles Machado que tanto contribuíram com a elaboração e prosseguimento do trabalho.*

*Frederico Sampaio Vasconcelos Vilela*

## RESUMO

### **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE ETANOL E AÇÚCAR. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A**

O diagnóstico de cargas ambientais e a busca pela eficiência energética na produção de açúcar e etanol proveniente da cana-de-açúcar tem sido uma das veementes preocupações dos setores envolvidos na área devido ao fato de a cana ser uma das principais fontes de energia renovável no Brasil, tratando-se de fator estratégico quanto ao surgimento de novas oportunidades produtivas com potencial de geração de lucro e atendimento à metas de governo. A busca pela redução de emissões de gases de efeito estufa e diminuição do uso de combustíveis fósseis são um dos principais alvos na busca pela sustentabilidade do setor sucroalcooleiro. Baseando-se nas questões levantadas, este trabalho objetiva analisar o desempenho ambiental e energético de um modelo industrial de forma a propor novos projetos e soluções ecoeficientes baseando-se na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Como estudo de caso, tomou-se com referência o sistema industrial da Usina Jalles Machado. Para obter os resultados esperados, seguiu-se as etapas de uma ACV conforme a metodologia padronizada pela norma ISO 14040. Dentre essas etapas a fase de elaboração de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) foi a que mais demandou trabalho por se tratar da fase de coleta de dados em campo e posterior estruturação para prosseguimento da ACV. Com o inventário concluído, as informações de ICV foram incluídas no software *GaBi 6 Education* para então serem analisados os balanços mássicos e energéticos. Primeiramente, toda a caracterização ambiental do padrão atual da usina foi realizado analisando emissões de carbono e depleção de recursos abióticos, posteriormente, avaliou-se os resultados obtidos para outros sete cenários arbitrados de acordo com projetos da usina considerando apenas emissões de CO<sub>2</sub>. Os resultados apontam que a cogeração de energia é etapa mais impactante em praticamente todos os quesitos estudados ao longo da produção industrial, tais como consumo de água, uso de vapor, consumo de eletricidade e geração de emissões. Já na comparação de cenários, concluiu-se que o uso da palha contribui consideravelmente com a elevação de emissões e com a quantidade de energia vendida para a rede, fato que gera discordâncias estratégicas. Ao final do estudo, realizou um comparativo entre produtividade, balanço de CO<sub>2</sub> e quantidade de energia vendida para os cenários avaliados. O estudo contribuiu para que fosse possível identificar novas soluções e projetos futuros que alie retorno financeiro e redução de emissões, além de identificar a contribuição referentes a impactos ambientais de todos os elos da cadeia produtiva do fase industrial da usina.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Açúcar, Etanol, Desempenho ambiental, Inventário de ciclo de vida.

## **ABSTRACT**

### **LIFE CYCLE ASSESSMENT OF INDUSTRIAL PRODUCTION OF ETHANOL AND SUGAR. Case Study: Jalles Machado S / A Plant.**

The diagnosis of environmental loads and the pursuit of energy efficiency in the production of sugar and ethanol from sugarcane has been a vehement concerns of the sectors involved in the area due to the fact that cane be a major source of renewable energy in Brazil , in the case of strategic factor as the emergence of new productive opportunities with potential for generating profit and service goals of the government. The quest for reducing emissions of greenhouse gases and reducing the use of fossil fuels are a major target in the search for sustainability of this sector. Based on the issues raised, this study aims to analyze the energy and environmental performance of an industrial model in order to propose new projects and eco-efficient solutions based on the methodology of Life Cycle Assessment (LCA). As a case study, taken with reference to the system of Jalles Machado industrial plant. To obtain the expected results, followed the steps of an LCA methodology as standardized by ISO 14040. Among these steps the preparation of Life Cycle Inventory (LCI) was the most demanded effort because it is the phase of data collection in the field and later for further structuring LCA. With the inventory complete, the LCI information included in the GaBi 6 Education software and then analyzing the energy and mass balances. First, all of the current standard environmental characterization of the plant was conducted by analyzing carbon emissions and depletion of abiotic resources, then assessed the results obtained for seven other scenarios arbitrated according to the power plant projects considering only CO<sub>2</sub> emissions. The results show that cogeneration power stage is most striking in virtually all questions studied over industrial production, such as water consumption, use of steam, electricity consumption and generation of emissions. In comparison scenarios, it was concluded that the use of straw contribute considerably with the rise of emissions and the amount of electricity sold to the grid, a fact that strategic disagreements. At the end of the study made a comparison between productivity and CO<sub>2</sub> balance amount of electricity sold to the scenarios evaluated. The study contributed to make it possible to identify new solutions and future projects, combining financial returns and reduced emissions, besides identifying the contribution regarding environmental impacts of all links in the production chain of the industrial phase of the plant.

Keywords: Life Cycle Assessment, Sugar, Ethanol, Environmental Performance, Life Cycle Inventory.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 – Motivação</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 – Objetivos</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3 – Ferramentas</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4 - Estrutura da dissertação</b> .....	<b>2</b>
<b>2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 - A cana-de-açúcar</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 - Histórico da produção de etanol e açúcar no país</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3 - Sustentabilidade da indústria sucroalcooleira</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4 - Estudo de caso: Usina Jalles Machado S/A</b> .....	<b>8</b>
<b>3 - AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1 - ACV da fase industrial de produção de etanol e açúcar</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2 – Análise de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)</b> .....	<b>13</b>
<b>4 - IMPACTOS AMBIENTAIS DA FASE INDUSTRIAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL E AÇÚCAR</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1 - Produção de resíduos de biomassa</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2 - Uso da água</b> .....	<b>17</b>
<b>4.3 - Aquecimento global</b> .....	<b>18</b>
<b>4.4 - Depleção abiótica</b> .....	<b>19</b>
<b>5 - PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL E AÇÚCAR</b> .....	<b>22</b>
<b>5.1 - Recepção, preparo e extração do caldo</b> .....	<b>23</b>
5.1.1 - Recepção.....	23
5.1.2 - Preparo.....	24
5.1.3 - Extração do caldo .....	25
5.1.3.1 - Moendas .....	26
5.1.3.2 - Difusores.....	27
<b>5.2 - Tratamento do caldo</b> .....	<b>27</b>
5.2.1- Caldo para produção de etanol .....	28
5.2.2 - Caldo para produção de açúcar.....	28
5.2.3 - Torta de filtro.....	29
<b>5.3 - Fermentação</b> .....	<b>30</b>
<b>5.4 - Destilação e desidratação</b> .....	<b>31</b>
5.4.1 - Obtenção de etanol hidratado .....	33
5.4.2 - Obtenção de etanol anidro .....	33
<b>5.5 - Fábrica de açúcar</b> .....	<b>34</b>
5.5.1 - Evaporação .....	35
5.5.2 - Cozimento.....	36
5.5.3 - Centrifugação .....	36
<b>5.6 - Cogeração de energia</b> .....	<b>37</b>
5.6.1 - Biomassa de cana-de-açúcar.....	38
5.6.1.1- Bagaço .....	39

5.6.1.2 - Palha .....	39
5.6.2 - Geração de eletricidade e vapor .....	40
5.6.2.1 - Caldeira.....	41
5.6.2.2 - Turbogeneradores .....	41
<b>6 - LOGÍSTICA DE TRANSPORTE DE INSUMOS E PRODUTOS .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1 - Transporte de cana-de-açúcar .....</b>	<b>43</b>
<b>6.2 - Transporte de resíduos .....</b>	<b>45</b>
<b>6.3 - Transporte de insumos .....</b>	<b>46</b>
<b>6.4 - Escoamento do açúcar .....</b>	<b>46</b>
<b>6.5 - Escoamento do etanol .....</b>	<b>47</b>
<b>7- DESCRIÇÃO METODOLÓGICA DAS ETAPAS DA ACV .....</b>	<b>49</b>
<b>7.1 – Definição de objetivo.....</b>	<b>49</b>
<b>7.2 – Definição de escopo .....</b>	<b>49</b>
7.2.1 - Função do sistema .....	49
7.2.2 - Unidade funcional .....	49
7.2.3 - Fluxo de referência .....	50
7.2.4 - Fronteira do sistema .....	50
<b>7.3 – Inventário de Ciclo de Vida (ICV).....</b>	<b>51</b>
<b>7.4 – Caracterização da Usina Jalles Machado S/A .....</b>	<b>52</b>
7.4.1 - Descrição do modelo tecnológico por etapa produtiva .....	54
<b>8 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>8.1 - Balanço mássico e energético da Usina Jalles Machado S/A .....</b>	<b>65</b>
8.1.1 - Consumo de água .....	65
8.1.2 - Balanços energéticos .....	67
8.1.3 - Balanços de emissões por categorias de impacto ambiental .....	69
<b>8.2 - Interpretação dos dados obtidos na ACV .....</b>	<b>71</b>
8.2.1 - Análise de cenários .....	71
8.2.2 - Análise de emissões de dióxido de carbono por cenário produtivo .....	71
8.2.3 - Análise da influência da variação de cenário na comercialização de energia ...	73
8.2.4 - Análise de produtividade por cenário produtivo .....	75
8.2.5 - Análise de <i>trade-off</i> : emissões de CO <sub>2</sub> x produtividade x venda de energia.....	76
<b>9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>90</b>
<b>A - FLUXOGRAMA GaBi DA ETAPA DE GERAÇÃO DE VAPOR E ELETRICIDADE COM USO DE PALHA.....</b>	<b>91</b>
<b>B - FLUXOGRAMA GaBi DA ETAPA DE TRATAMENTO DE CALDO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR ORGÂNICO.....</b>	<b>92</b>
<b>C - FLUXOGRAMA GaBi DA ETAPA DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR ORGÂNICO. 93</b>	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma esquemático do ciclo de vida de um produto.....	10
Figura 2 - Etapas de Avaliação de Ciclo de vida conforme ISO 14040.....	11
Figura 3 - Indicadores de impactos ambientais na etapa de AICV .....	13
Figura 4 - Fluxograma básico do processo de produção de etanol e açúcar .....	22
Figura 5 - Fluxograma do processo de extração do caldo. ....	26
Figura 6 - Descrição básica do processo de tratamento do caldo .....	27
Figura 7 – Funcionamento básico do processo de sulfitação . ....	29
Figura 8 – Fluxograma esquemático do processo de produção de torta de filtro .....	30
Figura 9 – Etapas do processo fermentativo .....	31
Figura 10 - Fluxograma esquemático do processo de destilação de desidratação com ciclohexano .....	32
Figura 11 – Fluxograma esquemático do setor de evaporação do caldo. ....	35
Figura 12 – Fluxograma esquemático do setor de cozimento .....	36
Figura 13 – Secagem, ensaque e transporte de açúcar . ....	37
Figura 14 – Sistema de cogeração típico de usinas brasileiras.....	38
Figura 15 – Diagrama esquemático do setor de caldeiras .....	41
Figura 16 - Sistema de geração de energia elétrica .....	42
Figura 17 - Rodotrem, Treminhão, Romeu e Julieta. ....	44
Figura 18 - Modelo da matriz de transporte conceitual.....	47
Figura 19 – Fluxos e etapas da cadeia logística do etanol.....	48
Figura 20 - Representação esquemática da fronteira do sistema do estudo. ....	50
Figura 21 – Fluxograma GaBi da fase industrial do processo produtivo da Usina Jalles Machado.....	53
Figura 22 - Fluxograma GaBi da etapa de recepção, preparo e extração do caldo. ....	57
Figura 23 - Fluxograma GaBi da etapa de desmineralização da água geração de vapor e eletricidade.....	58
Figura 24 - Fluxograma GaBi da etapa de tratamento do caldo.....	59
Figura 25 - Fluxograma GaBi da etapa de fabricação de açúcar.....	60
Figura 26 - Fluxograma GaBi da etapa de fermentação.....	61

Figura 27 - Fluxograma GaBi da etapa de obtenção de etanol.....	62
Figura 28 - Fluxograma GaBi da etapa de captação da água. ....	63
Figura 29 - Fluxograma GaBi da etapa de desmineralização da água.....	63
Figura 30 – Fluxograma GaBi da etapa de tratamento de água.....	64
Figura 31 - Consumo médio de água por etapa produtiva.....	66
Figura 32 - Consumo de eletricidade por etapa produtiva.....	68
Figura 33 - Contribuição de cada etapa produtiva no balanço de emissões de CO <sub>2</sub> e ADP fóssil.....	69
Figura 34 - Comparação de cenários produtivos referentes a balanço de CO <sub>2</sub> . ....	72
Figura 35 - Relação de aumento ou redução de emissões de CO <sub>2</sub> em relação ao cenário padrão.....	73
Figura 36 - Comparativo de emissão de CO <sub>2</sub> evitada devido à venda de energia.....	73
Figura 37 - Diagrama de venda de energia eletricidade por cenário produtivo. ....	74
Figura 38 - Relação entre emissões de CO <sub>2</sub> e venda de eletricidade.....	74
Figura 39 - Relação entre emissões evitadas de CO <sub>2</sub> e venda de eletricidade.....	75
Figura 40 - Influência da variação de cenário na produtividade de açúcar e etanol.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Imediata, Elementar e Poder Calorífico do Bagaço de Cana.....	39
Tabela 2 - Propriedades da palha e pontas de cana-de-açúcar. ....	40
Tabela 3 - Carga e consumo de diesel para os diferentes tipos de transporte de cana .....	44
Tabela 4 - Consumo de águas inseridas na produção industrial.....	67
Tabela 5 - Consumo vapor por etapa produtiva .....	68
Tabela 6 - Balanço de emissões de GWP e ADP fóssil por etapa produtiva .....	70
Tabela 7 - Relação entre emissões de CO <sub>2</sub> , produtividade e retorno financeiro por cenário produtivo.....	77

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Gerais

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ADP	<i>Abiotic Depletion Potential</i>
AICV	Análise de Inventário de Ciclo de Vida
BVQI	<i>Bureau Veritas Quality International</i>
CML	<i>Institute of Environmental Sciences</i>
CPS	Consumo e Produção Sustentáveis
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda química de Oxigênio
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
LCT	<i>Life Cycle Thinking</i>
PCV	Pensamento de Ciclo de Vida
Proálcool	Programa do Álcool Brasileiro
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>

### Elementos químicos / compostos químicos

CaSO <sub>3</sub>	Sulfito de cálcio
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Sacarose
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso

### Símbolos de medida

C	Carbono
---	---------

CO <sub>2</sub> - Equiv.	Dióxido de carbono equivalente
°C	Graus Celsius
g	Gramma
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kWh	Quilowatt-hora
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
MJ	Megajoule
MWh	Megawatt-hora
GL	Gay Lussac
h	Hora
H	Hidrogênio
L	Litros
O	Oxigênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
S	Enxofre
ton.	Tonelada
tcana	Tonelada de cana

### **Símbolos matemáticos**

%	Percentual
=	Igualdade
°	Graus
-	Subtração

## **1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 – Motivação**

Diante das crescentes preocupações acerca dos impactos ambientais provenientes produção de etanol e açúcar, principalmente relacionados à emissões de gases de efeito estufa e substituição de fontes de energia alternativas em relação aos fósseis, é essencial caracterizar o sistema produtivo que compõe o ciclo de vida desses produtos, de forma a visualizar o quanto soluções produtivas influenciarão no desempenho ambiental à medida que variáveis e considerações são adotadas no estudo. O uso da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida é considerada de uma ferramenta que contém a estrutura mais adequada para a visualização e obtenção de resultados que explicitam todo o mapeamento tecnológico e ambiental da fase industrial do setor sucroalcooleiro.

### **1.2 – Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo geral a caracterização dos impactos ambientais provenientes da fase industrial de produção de etanol e açúcar a partir da cana-de-açúcar da Usina Jalles Machado S/A baseando-se na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. A partir dos resultados obtidos, analisar e propor modelos tecnológicos que propiciem maior desempenho ambiental aliado com retorno econômico e produtividade.

Os objetivos específicos do estudos são:

- Elaborar o inventário de ciclo de vida na Usina Jalles Machado S/A;
- Quantificar os balanços que representam os custos ambientais oriundos dos escoamentos peculiares ao modelo tecnológico da Usina Jalles Machado S/A;
- Diagnosticar as contribuições de cada etapa produtiva ao longo do ciclo de vida do produto e, conseqüentemente, identificar os elos da cadeia produtiva da usina que são passíveis de melhorias referentes à desempenho ambiental, processos produtivos e eficiência energética;
- Avaliar o ciclo de vida do açúcar e etanol comparando diferentes categorias de impactos ambientais a partir da elaboração de balanços mássicos e energéticos;
- Ponderar a relevância de diagnósticos ambientais no âmbito do interesses estratégicos e estudos potenciais acerca da usina caracterizada;
- Analisar a influência da cadeia de fornecimento e de distribuição nos impactos.

### 1.3 – Ferramentas

As etapas metodológicas para elaboração do trabalho se basearam nas normas ISO 14040 e ISO 14044. Para caracterização do modelo tecnológico e obtenção dos resultados do estudo utilizou-se o software GaBi 6 Education®. O sistema de software para ACV e de bases de dados GaBi 6 para engenharia do ciclo de vida é um dos líderes do mercado mundial em ferramentas computacionais para ACV, e em particular, a sua base de dados é reconhecida pela sua qualidade e pelo volume de informação que contém, e dessa forma é especialmente utilizada por companhias, associações industriais, embora instituições governamentais, pesquisadores e consultores apresentem-se também como usuários importantes. Este produto é desenvolvido pela firma alemã PE International GmbH, que tem atuação internacional na área de consultoria em projetos de inventário e avaliação do ciclo de vida (respectivamente ICV e ACV).

### 1.4 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em nove capítulos principais, conforme a descrição a seguir:

- **Capítulo 1 – Introdução:** São apresentados a motivação e objetivos do estudo, ferramentas utilizadas e estrutura do trabalho.
- **Capítulo 2 – Contextualização do estudo:** contextualiza o setor sucroalcooleiro, os origens do cultivo de cana-de-açúcar e a inserção da temática da sustentabilidade no setor produtivo. É apresentada uma visão geral acerca da inclusão de preocupações ambientais em projetos e organização estratégica da Usina Jalles Machado.
- **Capítulo 3 – Avaliação de Ciclo de Vida (ACV):** apresenta as definições básicas acerca da metodologia de ACV conforme padronizado pela ISO 14040 e ISO 14044 e as inserem no contexto da fase industrial de cadeia produtiva do etanol e açúcar de forma a descrever os principais fatores de relevância no estudo do ciclo de vida desses produtos. Também são apresentadas a base conceitual do procedimento de quantificação e análise dos impactos ao longo do ciclo de vida de produto.
- **Capítulo 4 – Impactos ambientais da fase industrial do processo produtivo de etanol e açúcar:** o capítulo aborda sobre os principais impactos ambientais provenientes da fase industrial de produção de açúcar e etanol, estes que serão

avaliados na fase de análise e discussão de resultados. Baseando-se nos resultados obtidos dos balanços mássicos e energéticos da usina que apontaram os impactos mais relevantes, focalizou-se em descrever os efeitos ambientais advindos do uso da água e produção de resíduos, além das categorias que impactos relacionadas à potencial de aquecimento global e de depleção de recursos abióticos (fósseis).

- **Capítulo 5 – Processo produtivo de etanol e açúcar:** descreve as etapas produtivas da indústria sucroalcooleira padrão no Brasil e, conseqüentemente, da Usina Jalles Machado. São apresentados os conceitos básicos e valores numéricos específicos referentes aos processos unitários que compõem uma usina.
- **Capítulo 6 – Logística de transporte de insumos e produtos:** discorre sobre as principais peculiaridades da cadeia logística que envolve todo sistema produtivo de uma usina, fazendo uma breve descrição do funcionamento da etapa de fornecimento de insumos e distribuição de produtos. Basicamente, abordou-se o fornecimento de cana-de-açúcar e insumos industriais, o transporte de resíduos e a distribuição de açúcar e etanol para o mercado externo e interno, respectivamente.
- **Capítulo 7 – Descrição metodológica das etapas de ACV:** apresenta os aspectos metodológicos, padronizados pela ISO 14040, envolvidos nas etapas necessárias para a conclusão da Avaliação de Ciclo de Vida; a descrição da sua seqüência de etapas realizadas para a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida e a caracterização do modelo tecnológico da usina.
- **Capítulo 8 – Resultados e discussão:** analisa o desempenho ambiental do padrão atual da usina caracterizada, apresentando resultados relevantes obtidos a partir do balanço mássico e energético de todas as etapas da cadeia produtiva. Também são analisados cenários produtivos hipotéticos visando o diagnóstico do efeito da variação de opções produtivas baseadas em potenciais projetos a serem implantados na usina.
- **Capítulo 9 – Conclusões e recomendações:** apresenta as conclusões do trabalho e sugestão de trabalhos futuros.

## **2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO**

O setor sucroalcooleiro brasileiro tem um diferencial ambiental positivo, especialmente representado pela produção do etanol, combustível limpo e renovável, proveniente da cana-de-açúcar. O Brasil é destaque mundial no uso de energias renováveis, que representam mais de 44% da matriz energética do país e os produtos da cana-de-açúcar são responsáveis por 15,7% de toda a oferta de energia do país (UNICA, 2013). Este valor já ultrapassa o fornecido pelas usinas hidroelétricas.

A utilização extensiva do etanol como combustível automotivo no Brasil, seja em mistura de 25% v/v com a gasolina, como combustível dos veículos equipados com motor a etanol ou, ainda, nos recentemente lançados veículos com tecnologia flex fuel que operam com gasolina, etanol ou qualquer mistura desses combustíveis, confere ao país liderança no cenário internacional quanto ao seqüestro de carbono e à mitigação do efeito estufa (MACEDO *et al*, 2004).

Existem inúmeros problemas ambientais causados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis (por exemplo, as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), poluição e esgotamento de recursos), que destaca as desvantagens de uma relação desequilibrada de recursos e demandas associadas com esta não renovabilidade. O crescente interesse em alternativas de fontes renováveis, tais como os mitigadores de CO<sub>2</sub>, sugere que a biomassa derivada de produtos agrícolas é uma importante fonte de matérias-primas para diversos produtos e biocombustíveis (CALDEIRA-PIRES *et al*, 2013).

Os avanços do setor sucroenergético, no entanto, não ficaram restritos à tecnologia. O novo padrão de usina brasileira também está comprometido com as questões sociais e ambientais. A melhoria da qualidade de vida dos trabalhadores, a racionalização do uso da terra e da água, a mitigação dos efeitos com a mecanização da colheita e a preservação de ecossistemas fazem parte da agenda de trabalho do setor sucroenergético, que é um dos grandes empregadores no Brasil. Embora os avanços não sejam poucos, ainda há muito trabalho pela frente para que o setor possa crescer ainda mais (NEVES *et al*, 2010).

### **2.1 - A cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar foi oficialmente introduzida no Brasil por Martin Afonso de Souza, em 1532 (ANDRADE & DINIZ, 2007), para quebrar o monopólio mundial da França sobre o fornecimento de açúcar produzido nas ilhas do Caribe. Desde então, tem sido uma

importante atividade agrícola no país (MOREIRA & GOLDEMBERG, 1999) e é encontrada em todos os Estados. A região produtora de maior destaque é a Centro-Sul, com cerca de 85% da produção brasileira, sendo os 15% restantes produzidos na região Norte-Nordeste. O Estado de São Paulo concentra mais de 60% da produção nacional (ANDRADE & DINIZ, 2007).

Durante quase duzentos anos, após o descobrimento, a economia nacional baseou-se, praticamente, na agroindústria canavieira. Coube ao Governo Imperial, no final do século XIX, o início da modernização do setor. Data desta época, a instalação do Engenho Central de Piracicaba, fundado em 1881 e desativado em outubro de 1974 (ANDRADE & DINIZ, 2007).

A indústria de cana-de-açúcar é de longa data um dos sustentáculos da economia brasileira. A partir da introdução das primeiras mudas no país, por mais de dois séculos o açúcar foi o principal produto brasileiro. Há cerca de 40 anos, teve início a transformação do setor. Além do açúcar, as usinas passaram a ter foco na produção do etanol e, mais recentemente, a atenção voltou-se à bioeletricidade, aos álcoolquímicos e à comercialização de créditos de carbono. Tudo isso com a possibilidade do emprego de tecnologias avançadas que aumentam a produtividade e reduzem custos (NEVES *et al*, 2010).

Além da cultura da cana-de-açúcar ser um potencial gerador de energia renovável, contribuindo para a substituição de combustíveis fósseis e desenvolvendo um cenário agroenergético promissor, essa atividade é reconhecida por também ser uma grande transformadora das regiões onde atua. Uma expansão da produção de açúcar e etanol na escala pretendida pelo Brasil, durante as próximas décadas, deverá ocasionar diversos de impactos, sejam eles diretos

## **2.2 - Histórico da produção de etanol e açúcar no país**

A indústria alcooleira nacional surgiu a partir da destilação do mel residual, proveniente da fabricação de açúcar. Em 1931, por meio de Decreto, o Governo Vargas tornou obrigatória a mistura de 5% de álcool na gasolina (ANDRADE & DINIZ, 2007).

O Programa do Álcool Brasileiro (Proálcool) foi criado em 1975 com o objetivo de reduzir as importações de petróleo pela produção de etanol a partir da cana (MOREIRA & GOLDEMBERG, 1999). No Brasil, o etanol é usado em carros, como um intensificador de octanas oxigenado e aditivo para gasolina e dedicado a motores a etanol hidratado ou em veículos flex abastecidos com até E-100 (Etanol 99% v/v). No entanto, a expansão da produção de etanol a partir da cana para atender um mercado em expansão, assim como as

exportações para outros países, tem levantado preocupações sobre a sua sustentabilidade (GOLDEMBERG *et al.*, 2008).

A produção e o uso do etanol combustível no Brasil constituem, desde 1975, o mais importante programa de combustível comercial renovável implantado no mundo até hoje. Décadas de investimento dos setores público e privado em agroenergia tem posicionado o país como o líder mundial na produção de biocombustíveis (RODRÍGUEZ, 2010). Naquele tempo o preço do açúcar no mercado internacional estava diminuindo muito rapidamente e tornou-se vantajoso para mudar de açúcar para a produção de etanol (MOREIRA & GOLDEMBERG, 1999).

Desta época datam os primeiros automóveis a etanol fabricados em série e a intensificação da mistura de etanol anidro à gasolina, tornando-se o único país do mundo a conseguir substituir, em larga escala, o consumo de gasolina por fonte renovável (ANDRADE & DINIZ, 2007). Entre os biocombustíveis, o etanol é o que até o momento atraiu mais atenção, já que é produzido em larga escala (Brasil e EUA) e pode ser facilmente misturado com gasolina para operar em motores de ignição por centelha (GOLDEMBERG, COELHO, & GUARDABASSI, 2008).

### **2.3 – Sustentabilidade da indústria sucroalcooleira**

A definição sintética de sustentabilidade é a que diz que uma sociedade pode ser considerada sustentável quando ela atende às necessidades da geração atual e ainda preserva ou mantém a possibilidade de gerações futuras satisfazerem as suas (JANNUZZI, 2010). As ações em busca da sustentabilidade contribuem para que novos modelos de negócios possam ser aplicados de forma que as empresas possam alcançar mais sucesso na conjuntura de escassez de recursos e as expectativas mais rigorosas dos *stakeholder*<sup>1</sup>, de modo que o mercado exige que haja esforços para encontrar caminhos alternativos capazes de construir modelos de negócios que sejam sustentáveis e lucrativos (UNEP/SETAC, 2010).

A produção de açúcar e etanol sustentável pode ser aplicada de forma que visualize de forma completa o processo produtivo de forma que análises sejam feitas especialmente no direcionamento das chamadas tecnologias de segunda geração<sup>2</sup> (RODRÍGUEZ, 2010).

---

<sup>1</sup> Uma pessoa, grupo ou organização que tenha interesse ou preocupação em uma organização, ou seja, as partes interessadas podem afetar ou ser afetado por ações da organização, objetivos e políticas. Alguns exemplos dos principais interessados são credores, diretores, funcionários, governo (e suas agências), proprietários (acionistas), fornecedores, sindicatos, dentre outros. (<http://www.businessdictionary.com>)

<sup>2</sup> Tecnologias de segunda geração: O etanol de segunda geração, produzido a partir da celulose, presente nos resíduos da cana-de-açúcar e em outras matérias-primas vegetais, é uma alternativa fundamental aos cerca de cem países capazes de produzir o combustível renovável e que desejam fazê-lo sem prejudicar a produção de alimentos.

A rápida expansão da produção de etanol a partir da cana no Brasil tem levantado uma série de perguntas sobre as suas consequências negativas e sustentabilidade. Efeitos positivos são a eliminação de compostos de chumbo da gasolina e a redução de emissões nocivas. Há também a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que o etanol requer apenas uma pequena quantidade de combustível fóssil para a sua produção, sendo, portanto, um combustível renovável (GOLDEMBERG *et al*, 2008).

O declínio de reservas de petróleo e reservas de gás acampanhados do problema de mudanças climáticas contribuiu para o desenvolvimento de fontes de energia capazes de minimizar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e expandir o uso de tecnologias que tenham como princípio o uso de fontes de energia renováveis, tais como a solar, geotérmica, eólica, hidráulica e a bioenergia (KIATKITTIPONG *et al*, 2009).

A indústria sucroalcooleira é tida como uma importante solução no âmbito da diminuição da dependência sobre o petróleo, em resposta à exponencial elevação do seu preço nos últimos anos e do desenvolvimento de combustíveis capazes de reduzir as emissões de GEE (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, e N<sub>2</sub>O) quando comparados à gasolina e diesel derivados do petróleo (RODRÍGUEZ, 2010). Essas emissões de GEE são significativas em todo ciclo produtivo do etanol e açúcar, ou seja, na produção agrícola, na conversão industrial, no transporte e distribuição do etanol e em seu uso final (FILHO & MACEDO, 2010).

As questões do aquecimento global têm sido cada vez mais um foco de atenção ao maior uso de biocombustíveis, que têm sido capazes de competir com combustíveis derivados de petróleo no mercado de transporte, podendo ajudar a cumprir o Protocolo de Quioto (MACEDO, SEABRA & SILVA, 2008). O Protocolo de Quioto, em sua essência, estabeleceu limites para as emissões nacionais agregadas para os países já industrializados, programas nacionais de mitigação de emissões para todos os países, e mecanismos de “mercado de carbono” para minimizar o custo geral das reduções de emissões (FILHO & MACEDO, 2010).

Emissões de GEE são evitadas pelo uso do bagaço excedente como combustível em unidades industriais, substituindo o óleo combustível, e pelo uso do etanol como combustível automotivo, substituindo a gasolina. No futuro próximo, parte do bagaço (e da palha) poderão produzir quantidades apreciáveis de energia elétrica adicional e também de etanol. (MACEDO, LEAL, & SILVA, 2004).

O setor de transporte é quase exclusivamente dependente de combustíveis derivados de petróleo e grande atenção tem sido dada ao uso potencial da biomassa como base para a produção de combustível alternativo para utilização em motores veiculares (MACEDO *et*

al, 2008). Os biocombustíveis deverão desempenhar um papel cada vez mais importante no mercado de transporte, como forma de reduzir o esgotamento dos combustíveis fósseis e as emissões. No entanto, a magnitude da substituição dos bicombustíveis por combustíveis fósseis depende da maneira na qual eles são produzidos (MALÇA & FREIRE, 2006).

Os impactos positivos são particularmente visíveis na melhoria da qualidade do ar das áreas metropolitanas, mas também em áreas rurais, onde a colheita mecanizada de cana crua está sendo introduzida, eliminando a queima da cana (MALÇA & FREIRE, 2006). Impactos negativos, tais como a produção de etanol em larga escala a partir da cana pode levar à destruição ou danificação de áreas de alta biodiversidade, desmatamento, degradação dos solos, e competição e esgotamento de recursos, causando um agravamento das condições de trabalho nos campos (GOLDEMBERG, COELHO, & GUARDABASSI, 2008).

Segundo Filho e Macedo (2010), ainda há divergências em alguns pontos relacionados às diferentes opções de cômputo das emissões e mitigação com subprodutos e sobre alguns parâmetros de processo.

#### **2.4 - Estudo de caso: Usina Jalles Machado S/A**

Diante do declínio do Proálcool, a Usina Jalles Machado S/A (localizada em Goianésia – GO), que, até então, fabricava somente etanol, iniciou uma nova fase ao investir na extração do açúcar cristal a partir de 1993. Além do açúcar cristal, a usina fabrica, desde 2003, o açúcar orgânico. Por ser produzido sem aditivos químicos, tanto no cultivo da cana quanto no processamento industrial do produto, esse tipo de açúcar apresenta um bom diferencial no mercado. Atualmente, a usina também produz etanol anidro e hidratado, produtos de higiene e limpeza, energia elétrica, levedura e látex crescente a cada ano.

A usina é a primeira empresa do setor sucroalcooleiro brasileiro a efetivar a comercialização de créditos de carbono. Possui o certificado do *Bureau Veritas Quality International (BVQI)*, que a credencia para operar nesse mercado, criado a partir da assinatura do Protocolo de Quioto. Isso foi possível devido ao programa de cogeração de energia elétrica por meio do bagaço da cana para enquadrar nas normas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) para redução de Gases do Efeito Estufa (GEE).

A Jalles Machado produz toda a energia que consome e vende a produção excedente. A empresa foi pioneira no Estado de Goiás na implantação da cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana. A central termoeletrica tem capacidade para gerar 40 MWh, suficientes para abastecer uma cidade de 150 mil habitantes.

### 3 - AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e o Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) são as abordagens científicas pautadas em modernas políticas ambientais e de apoio a tomadas de decisão em empresas relacionada ao Consumo e Produção Sustentáveis (CPS). O *International Reference Life Cycle Data System (ILCD)* fornece uma base comum para estudos e dados de ciclo vida consistentes, robustos e de qualidade garantida. Esses dados e estudos corroboram com instrumentos coerentes de CPS, como *Ecolabelling*<sup>3</sup>, *Ecodesign*<sup>4</sup>, pegada de carbono e contratos públicos ecológicos (ILCD Handbook, 2010).

O Pensamento de Ciclo de Vida, *Life Cycle Thinking (LCT)*, diz respeito a ir além do foco tradicional no local de produção e nos processos produtivos para incluir os impactos ambiental, social e econômico de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida (UNEP, 2007). Apresentam como principais objetivos reduzir o uso de recursos e as emissões associadas, e melhorar o desempenho socioeconômico do modelo de produção e consumo ao longo de todo o ciclo de vida, facilitando a análise das relações entre as dimensões social, ambiental e econômica internamente às organizações e ao longo da cadeia de suprimento (CARVALHO, 2011).

De acordo com Rojas (2012), “a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta analítica para estimar, avaliar e interpretar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto. ACV é uma ferramenta da área de ecologia industrial padronizada pela Organização Internacional para Normalização nas séries da norma ISO 14040, que visa apoiar decisões com respeito a políticas públicas, *design* de produtos, compras, melhorias nos processos produtivos e projetos numa perspectiva ambiental”.

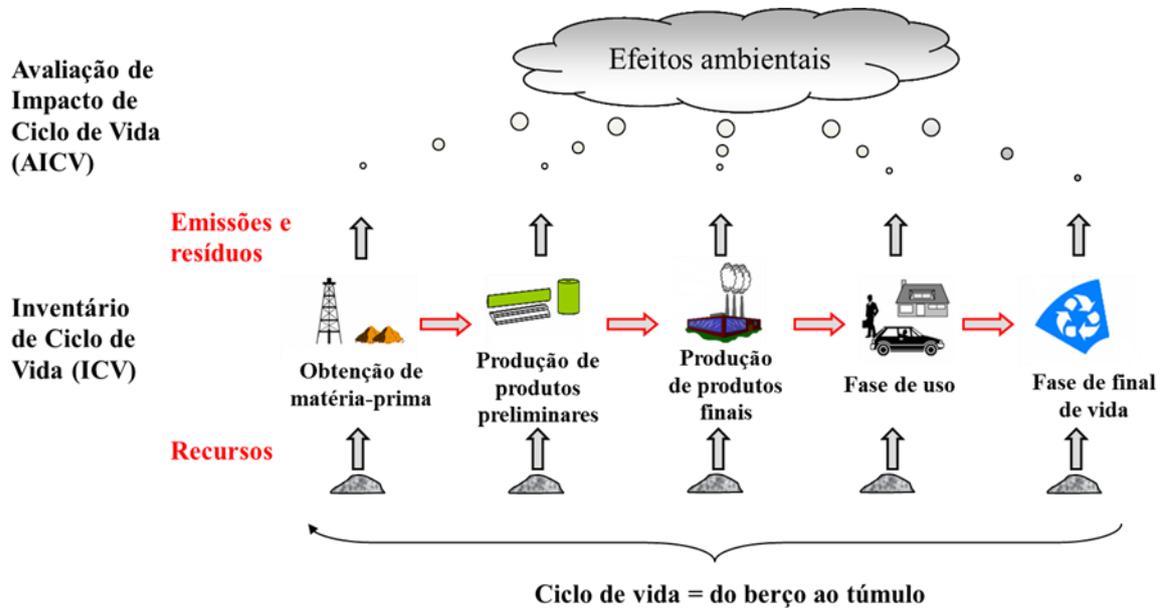
A ACV é um método estruturado, abrangente e padronizado internacionalmente. Quantifica todas as emissões pertinentes e os recursos consumidos e os impactos ambientais e na saúde relacionados com questões de recursos e de esgotamento que estão associados a qualquer bens ou serviços (VILELA, CALDEIRA-PIRES, & LUZ, 2012).

---

<sup>3</sup>*Ecolabelling* é um rótulo de comprovação de preferência ambiental de um produto ou serviço dentro de uma categoria de produto/serviço específico. Ao contrário dos rótulos "verdes", desenvolvidos pelos fabricantes e prestadores de serviços, tratam-se de rótulos mais credíveis baseados em considerações de ciclo de vida, pois eles são concedidos por uma terceira parte imparcial em relação a certos produtos ou serviços (Global Ecolabelling Network, 2013).

<sup>4</sup> *Ecodesign* implica em considerar os impactos ambientais de um produto desde primeira etapa do projeto, evitando o seu planejamento descoordenado. Os requisitos de concepção ecológica não devem reduzir a funcionalidade de um produto, segurança e ter impacto negativo na acessibilidade e saúde dos consumidores ([http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/files/brochure\\_ecodesign\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/files/brochure_ecodesign_en.pdf)).

A ACV do produto completo desde a extração de recursos, produção, uso e reciclagem, até a eliminação dos resíduos é ilustrada na Figura 1. Os estudos de ACV podem ajudar a evitar ou resolver um problema ambiental, criando outros, pois onde você pode reduzir o impacto ambiental em um ponto no ciclo de vida apenas para aumentá-la em outro ponto.



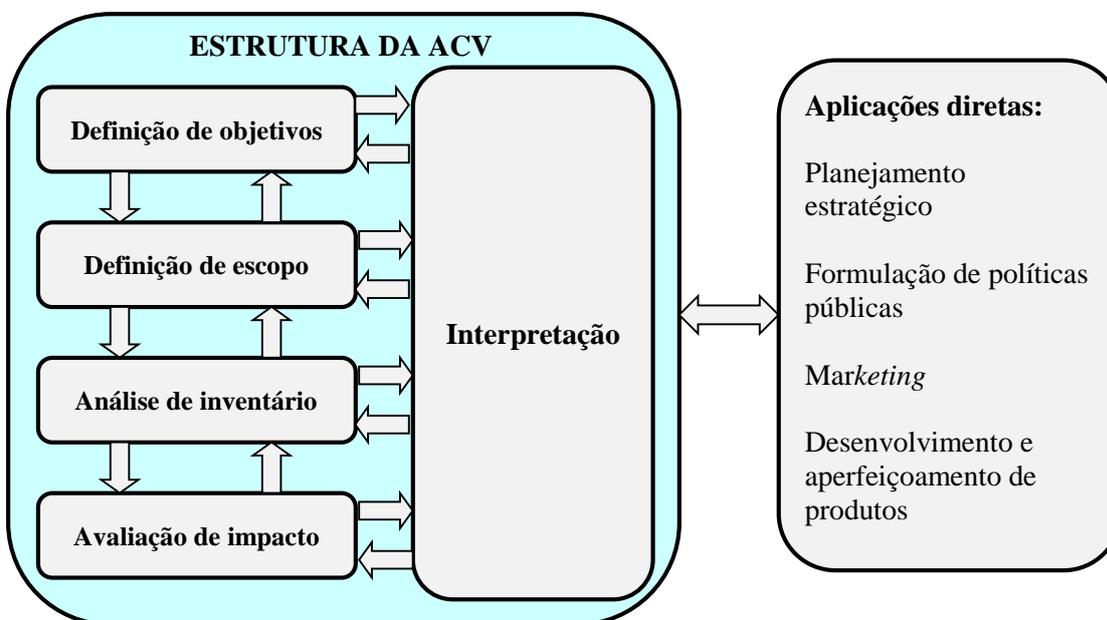
**Figura 1** – Fluxograma esquemático do ciclo de vida de um produto (PE International, 2013)

Conforme definição da “*United States Environmental Protection Agency*” (EPA), “a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) emprega uma abordagem sistêmica para avaliar sistemas industriais em toda a sua vida útil. O objetivo é estudar as consequências ambientais de um determinado produto, processo ou atividade desde a sua criação (extração de matéria prima), até a sua disposição final”.

Aumentar a conscientização da importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados com produtos (fabricados e consumidos) reforçou o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e conter esses impactos ao longo do seu ciclo vida (UNEP/SETAC, 2010). O estudo ACV oferece uma visualização abrangente dos fluxos de energia e materiais por meio de um sistema e dá uma base holística e objetiva para comparação. ACV é baseada em uma cadeia de processos, analisando produto como uma sequência de subsistemas que as entradas e saídas se interconectam (VILELA, CALDEIRA-PIRES, & LUZ, 2012). Os resultados de uma ACV visam quantificar os impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida,

ajudando a identificar oportunidades de melhoria e indicar opções mais sustentáveis a partir de comparações e análise (MALÇA & FREIRE, 2006).

Conforme a norma ISO 14040, a ACV é conduzida considerando as etapas de definição de metas, definição de escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. A Figura 2 mostra as etapas da ACV de forma esquemática.



**Figura 2** - Etapas de Avaliação de Ciclo de vida conforme ISO 14040 (adaptado de ILCD Handbook, 2010).

A ACV pode ser aplicável na identificação de oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida; informação aos tomadores de decisões em organizações governamentais, indústria ou não governamentais; Seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição; *Marketing* (UNEP/SETAC, 2010). Ou seja, a ACV é uma ferramenta essencial para melhoria de eficiência dos recursos - que permite que as empresas e *stakeholders* possam identificar "pontos fracos" ao longo da cadeia de suprimentos, bem como os riscos potenciais e as oportunidades de melhorias (LUO, VOET, & HUPPES, 2009).

### 3.1 - ACV da fase industrial de produção de etanol e açúcar

Diante da relevância do cultivo de cana no país, Ometto *et al* (2008) considera oportuna a inclusão das preocupações ambientais no planejamento do ciclo de vida deste produto para otimização produtiva e redução dos impactos negativos sobre a saúde humana e meio ambiente visando desenvolver produtos finais mais sustentáveis. O setor sucroalcooleiro colabora significativamente para o desenvolvimento sustentado, de modo que

possui menores impactos ambientais que as energias de origem fóssil. Além disso, propicia segurança no fornecimento local de energia e em longo prazo pode induzir a promoção de novas tecnologias, geração de empregos e renda (LUCON, 2008).

O balanço de emissões de gases de efeito estufa e de energia fóssil no ciclo de vida do açúcar e do etanol provenientes de cana-de-açúcar é importante por avaliar as emissões de gases de efeito estufa e o consumo primário de combustíveis fósseis ao longo de todo o ciclo de vida destes produtos. Assim, essas variáveis determinam o potencial da indústria sucroalcooleira relacionado à mitigação de emissões de GEE e eficácia do nível de substituição de combustíveis fósseis (KIATKITTIPONG *et al*, 2009).

O etanol de cana-de-açúcar, que apresenta balanço energético e de emissões significativamente favorável, é uma alternativa disponível comercialmente e com grande potencial de rápida expansão em muitos países, inclusive com novas aplicações (FILHO & MACEDO, 2010). Para avaliar os méritos de substituição de gasolina por etanol, uma análise do balanço de energia e de GEE emitidas e evitadas tem que ser realizada por meio da ACV (GOLDEMBERG *et al*, 2008). Sob a ótica de ciclo de vida, o etanol de cana-de-açúcar tem capacidade de reduzir em cerca até 90% as emissões de GEE quando comparado com a gasolina, no Brasil (FILHO & MACEDO, 2010).

Há uma série de razões para a avaliação do etanol combustível a partir da cana brasileira, dentre elas estão: o etanol combustível produzido a partir da cana é baseado em recursos renováveis; muitas atividades do ciclo de vida do etanol combustível brasileiro tem sido praticadas por um longo período de tempo; possibilidade de cogeração de eletricidade a partir de resíduos sólidos; e ainda há uma série de melhorias potenciais das interações ambientais como a reciclagem de frações de resíduos (OMETTO, 2005).

Na indústria de açúcar, diferentes tamanhos de cristais de açúcar e também alguns subprodutos como o bagaço, melaço, torta de filtro e cinzas são produzidos (ENSINAS *et al*, 2006). Destes, alguns são usados como recursos de entrada em outras plantas, assim como na própria usina para a utilização otimizada dos resíduos produzidos na indústria. A ACV e os métodos de gestão de resíduos podem analisar, reduzir os efeitos ambientais estimar o consumo de energia e a carga ambiental da produção de açúcar (CHAUHAN *et al*, 2011).

Utilizando ACV, é possível estudar as melhorias no equilíbrio energético na indústria do açúcar tais como o aumento do número de efeitos de evaporador, a minimização da quantidade de água utilizada na indústria, o uso de vapor para aquecimento do caldo, a geração de eletricidade excedente a partir do bagaço, a necessidade de integração térmica da

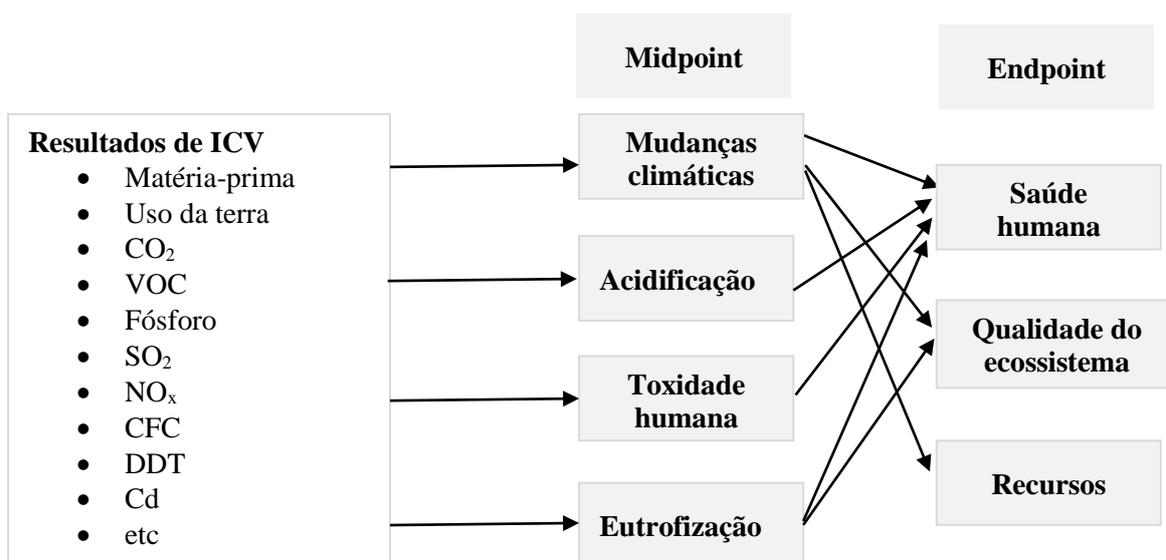
indústria, aquecimento do caldo com condensados e evaporação com evaporador de filme descendente (ENSINAS *et al*, 2006).

Apesar do rápido crescimento da produção mundial de açúcar e etanol, os seus benefícios na mitigação das emissões de GEE e substituição dos combustíveis fósseis continuam a ser questionadas (KIATKITTIPONG *et al*, 2009). Vários estudos de ciclo de vida realizados chegaram a conclusões diferentes e contraditórias. Uma explicação para essa disparidade é que diferentes metodologias e premissas são frequentemente utilizadas, tais como definições de fronteiras do sistema, fatores de emissão, inclusões e exclusões de coprodutos e métodos diferentes para alocação de cargas ambientais (GARCÍA *et al*, 2011).

### 3.2 – Análise de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

A AICV é a identificação, e se possível quantificação, dos impactos causados no meio pelos efeitos listados no inventário de ciclo de vida. Pode também incluir impactos em aspectos como saúde das pessoas, meio econômico, social e cultural (OMETTO, 2005). Sua estrutura geral é composta de três elementos obrigatórios que convertem os resultados do ICV em indicadores por categoria de impacto, são eles: seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelo de caracterização, classificação e caracterização.

Os resultados de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) são analisados a partir da escolha um método de avaliação de impactos ambientais (UNEP/SETAC, 2012). Os impactos podem ser avaliados como *midpoint* ou *endpoint* (Figura 3).



**Figura 3** - Indicadores de impactos ambientais na etapa de AICV (UNEP/SETAC, 2012).

Os *midpoints* referem-se aos impactos diretamente relacionados aos componentes emitidos que foram identificados na ICV, ou seja, seus respectivos potenciais de impactos ambientais na natureza e no homem. No caso de *endpoint*, a AICV visa interligar as emissões e demandas de recursos com danos à saúde humana, qualidade do ecossistema e origem de recursos. Vários modelos de caracterização podem ser usados para vincular os resultados do inventário com as categorias de impacto *midpoint* e *endpoint*: a escolha do modelo depende do objetivo e escopo do estudo e dos partes afetadas pelo resultado.

A normalização, agregação, e alocação são passos opcionais AICV, de acordo com a ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). Enquanto o primeiro proporciona a contribuição de cada categoria de impacto, em comparação com uma referência através da conversão de unidades diferentes para um formato comum e adimensional, agregação e ponderação permitem a conversão (de fatores numéricos) e a possível agregação dos resultados do indicador por categorias de impacto (UNEP/SETAC, 2012).

## **4 - IMPACTOS AMBIENTAIS DA FASE INDUSTRIAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL E AÇÚCAR**

O Brasil é líder mundial na produção de cana-de-açúcar e de seus principais produtos, açúcar e etanol, e experimenta uma nova fase de expansão em função do aumento das demandas internas e externas (LORA, 2008). A expansão do setor sucroalcooleiro levanta discussões referentes à sustentabilidade ambiental da produção brasileira de cana-de-açúcar e seus produtos. As excessivas exigências acabam por prejudicar a penetração do etanol brasileiro em outros mercados, o que deve levar os empresários do setor à tomada de medidas de controle mais rigorosas sobre os impactos ambientais<sup>5</sup> de suas atividades (COELHO *et al*, 2010).

A cogeração de energia, uma prática comum na indústria de processamento de etanol e açúcar no Brasil, reduz os danos ambientais e sua utilização pode ser significativamente aumentada se o desenvolvimento tecnológico contribuir para a utilização de outros resíduos de cana de açúcar (pontas e folhas), além de bagaço, para geração de energia (SMEETS *et al* 2008). Entretanto, a queima de bagaço de cana gera alguns poluentes como material particulado, monóxido e dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio (ANDRADE & DINIZ, 2007). As emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são muito baixas, consideradas praticamente desprezíveis (COELHO *et al*, 2010).

É normalmente aceito que o poluente mais significativo emitido por caldeiras de bagaço seja o material particulado, este que está associado ao residual de cinzas, fuligens e outros materiais. A emissão desses resíduos provocam efeitos estéticos indesejáveis em virtude de sua cor escura e causa incômodos ao bem estar público por sua precipitação nas residências. Sua fração inalável pode penetrar nos pulmões, diminuindo a capacidade respiratória. Para seu controle, geralmente, são empregados lavadores de gases que ao menos no início da safra os retém, satisfatoriamente (COELHO *et al*, 2010).

As novas caldeiras a bagaço de cana ficam sujeitas ao controle de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e material particulado, além de fumaça composta de partículas pequenas de poeira, fuligem e outros materiais. O licenciamento ambiental renovável faz exigências de melhoria das caldeiras antigas, principalmente para a otimização

---

<sup>5</sup> A Resolução do CONAMA nº 01/86 define impacto ambiental como: “(...) qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afete: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições sanitárias e estéticas do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais”.

das condições de queima e redução de emissões com sistemas de controle mais eficazes (LUCON (2008) *apud* COELHO *et al*, 2010).

Nas etapas de fermentação e destilação podem ocorrer emissões de dióxido de carbono, aldeídos, álcool e ciclohexano. No contexto do Proálcool, as unidades de fermentação e destilação atingiam volumes diários de fabricação de 60 a 120 m<sup>3</sup>/dia. Atualmente, há destilarias que atingem produções de até 1000 m<sup>3</sup>/dia (ANDRADE & DINIZ, 2007). Desta forma, as emissões são bastante significativas, diante deste aumento de capacidade de processamento industrial, cujos odores são perceptíveis aos transeuntes externos às destilarias.

Embora seja considerado que as emissões de dióxido de carbono são reabsorvidas pelo crescimento dos canaviais na safra subsequente, tem-se que, estequiometricamente, para cada 92 g de etanol produzido são gerados 88 g de gás carbônico (ANDRADE & DINIZ, 2007), lançados na atmosfera, sem reaproveitamento.

#### **4.1 – Produção de resíduos de biomassa**

A indústria sucroalcooleira produz resíduos sólidos, além do bagaço de cana, palhas e pontas (citados no item anterior), também são produzidos vinhaça, melaço (ou mel final), torta de filtro e cinzas e fuligem provenientes da caldeira.

A vinhaça é um resíduo gerado na etapa de destilação do vinho para produção de etanol. A torta de filtro é gerada nos filtros rotativos para extração da sacarose residual na produção de açúcar e fósforo adicionado ao processo de clarificação (BERTONCINI, 2008). As de cinzas e fuligem geradas nas chaminés das caldeiras são lavadas normalmente com água de reúso aproveitada da lavagem de cana, a fuligem diferencia-se das cinzas pela quantidade de água em sua composição (ANDRADE & DINIZ, 2007). Já melaço é inserido como insumo no processo de fermentação.

A vinhaça, a torta de filtro e as cinzas são utilizadas diretamente em solos agrícolas, promovendo a reciclagem de quase 100 % dos nutrientes que entram no sistema produtivo, reduzindo o uso de fertilizantes químicos. A reciclagem destes produtos industriais, proporcionam resultados favoráveis quanto à otimização do uso de potássio, aumentando o suprimento de nutrientes no campo (COELHO *et al*, 2010).

A aplicação de vinhaça no solo melhora as características físicas e químicas do solo, reduz o pH, neutralizando ou alcalinizando o solo, aumenta a capacidade retenção de água, aumenta a capacidade de retenção mineral, conserva ou melhora a fertilidade e aumenta a micro-flora (ZANDBERGEN, 1993).

As cinzas podem ser utilizadas diretamente no solo ou incrementando a composição química de compostos orgânicos. Sua geração depende da composição química elementar da biomassa e da quantidade de impurezas, não combustíveis, introduzidas na caldeira. Admite-se que há 5 kg/t cana, assumindo que toda a cinza presente no bagaço se transforme em resíduos na caldeira (ANDRADE & DINIZ, 2007).

A fábrica de açúcar enfrenta problemas relacionados aos resíduos que contêm materiais orgânicos devido a produtos químicos usados na sulfitação e calagem, fosfatação no tratamento do caldo misto e na remoção de coloração. Nesta etapa, métodos tradicionais não utilizam tecnologias para remoção de substâncias como ceras, amido, bactérias e sacarose (CHAUHAN *et al*, 2011).

#### **4.2 - Uso da água**

Os impactos da cultura de cana no suprimento de água (volume e qualidade) são pequenos nos dias de hoje quando comparados à panoramas anteriores. Os principais motivos são a importante redução obtida nos últimos anos na captação de água para uso industrial com o emprego do conceito de produção mais limpa, com re-utilização interna nos processos, e a prática de devolver a água para a lavoura, nos sistemas de fertirrigação (RODRÍGUEZ, 2010). Conforme Januzzi (2010), a metodologia mais adequada para se analisar e quantificar o uso da água para a produção de um produto é a ACV.

Os impactos provocados pelas usinas sucroalcooleiras no suprimento de água são de natureza quantitativa e qualitativa, podendo degradar os recursos hídricos pelo uso intensivo, causando escassez, e também pelo grande potencial poluidor das atividades agroindustriais e uso do solo (NETO, 2001). Os efluentes do setor sucroalcooleiro são os principais potenciais causadores dos impactos ambientais aos recursos hídricos, sendo a vinhaça e as águas de lavagem, de alta carga orgânica (DQO/ DBO<sup>6</sup>), os resíduos líquidos considerados de maior relevância (COELHO *et al*, 2010).

O uso de água no processo é relativamente alto. Atualmente, nas condições do Centro-Sul brasileiro, a captação está em torno de 1,8 m<sup>3</sup> por tonelada de cana processada (CGEE & BNDES, 2008), mas a quantidade vem reduzindo de modo significativo como resultado da implantação de medidas de reuso, que permitem reduzir tanto o nível de captação quanto a disposição de água tratada. Embora a demanda de água na fase industrial

---

<sup>6</sup> A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é um parâmetro que indica a quantidade de oxigênio consumida durante a degradação bioquímica da matéria orgânica juntamente com o oxigênio usado na oxidação de produtos inorgânicos em certo período de tempo. A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é a quantidade de "O<sub>2</sub>" necessária para a oxidação da matéria orgânica através de um agente químico (MEDEIROS *et al*, 2006).

não seja a principal, existe uma tendência recente de crescimento e, conseqüentemente, maior preocupação em desenvolver sistemas que proporcionem uma redução do consumo (CARMO, 2008).

Esforços concentram-se em uso racional da água com reaproveitamento máximo de despejos, diminuição da captação e incorporação de novas tecnologias, como limpeza de cana a seco, biodigestão de vinhaça e fertirrigação (COELHO *et al*, 2010). A vinhaça é reutilizada nos campos como fertilizante. Sabe-se que o uso da vinhaça como fertilizante não contribui para a contaminação das águas subterrâneas se sua aplicação for controlada limitando o volume de vinhaça por hectare (MOREIRA & GOLDEMBERG, 1999).

Os pontos mais importantes referentes aos fluxos de captação e uso de água no processo convencional industrial de produção de etanol e açúcar são a etapa de lavagem de cana-de-açúcar, etapas de evaporação/ condensação, destilação (águas residuais, água aquecedora, lavagens de pisos e tanques e descartes) lavagem dos gases e resfriamento de mancais e caldeiras (JANNUZZI, 2010).

Algumas soluções de redução de consumo industrial de água propostas são a substituição dos sistemas de lavagem da cana por sistemas de lavagem a seco, otimização da etapa de evaporação, utilizando a sangria de vapor em seus múltiplos efeitos e aproveitamento a condensação, uso de novas tecnologias com a utilização de membranas reduzindo a necessidade de consumo de água nos processos de destilação e desidratação e minimização do consumo interno de água. Além disso, a concentração da vinhaça integrada à destilação poderá contribuir sensivelmente para a redução de necessidade de água (JANNUZZI, 2010).

### **4.3 - Aquecimento global**

O aquecimento global decorre das atividades humanas que aumentam a concentração na atmosfera dos gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (queima de combustíveis fósseis, fabricação de cimento, e desflorestamento), metano (decomposição anaeróbica de matéria orgânica), óxido nitroso (fertilizantes nitrogenados e indústria química) e certos gases industriais à base de halogênios. A alta concentração desses gases produz um aquecimento gradual da superfície da Terra mudando a dinâmica dos oceanos e da atmosfera. Estima-se que tais mudanças causarão prejuízos de vários tipos no futuro. Os ecossistemas estão adaptados ao clima atual, assim como as atividades humanas, e a mudança de clima prevista é muito mais rápida do que a capacidade de adaptação da natureza ou da humanidade (FILHO & MACEDO, 2010).

O aquecimento global é definido como o impacto que as emissões resultantes das atividades humanas possuem na absorção da radiação pela atmosfera. Possui amplas implicações na saúde humana e no ecossistema refletindo na produção de grãos, energia, produção de biomassa, casos de doenças infecciosas e etc. Heijungs et al. apud CML, (2001) calcula os impactos das emissões de diferentes gases, a cada um é atribuído um índice de potencial de aquecimento global (GWP) que expressa a proporção, integrada no tempo, entre o aumento da absorção da radiação infravermelha da substância considerada e o aumento da absorção da radiação infravermelha devido a emissão de 1 kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) \cdot dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) \cdot dt} \quad (I)$$

Onde:

- GWP<sub>T,i</sub> = potencial de aquecimento global do gás i pelo período de T anos (kg de CO<sub>2</sub> equivalente);
- a<sub>i</sub> = forçagem<sup>7</sup> radioativa por unidade de concentração do gás i (w.m<sup>-2</sup>.kg<sup>-1</sup>);
- c<sub>i</sub>(t) = concentração do gás i no tempo t após a emissão (kg.m<sup>-3</sup>);
- T = tempo de integração considerado (anos).

O potencial de aquecimento global depende do horizonte de tempo no qual a integração é calculada. Tempos longos (100 a 500) anos são normalmente usados para se quantificar os efeitos cumulativos enquanto os pequenos (20 e 50 anos) são usados para uma indicação dos efeitos de curto prazo. Porém, é notado que, quanto mais o horizonte de tempo se expande maiores são as incertezas dos resultados, sendo que o CML (2001) recomenda a utilização do índice GWP integrado em 100 anos. Atualmente o painel intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC) possui disponível uma lista das melhores estimativas para o fator de caracterização GWP baseado em estudos de pesquisadores renomados.

#### 4.4 – Depleção abiótica

Recursos abióticos são recursos naturais (incluindo recursos energéticos) como minério de ferro, óleo bruto e energia eólica que são considerados sistemas não vivos. Depleção de recursos abióticos é uma das mais frequentes categorias de impactos discutidas e há, portanto, uma grande variedade de métodos disponíveis para caracterizar as

---

<sup>7</sup> Forçagem radioativa é definida como a diferença entre a energia radiante recebida pela Terra e a energia irradiada de volta para o espaço. Causas da forçagem radioativa incluem mudanças na insolação (radiação solar incidente) e da concentração de gases radioativamente ativos e aerossóis. (<http://www.rsc.org>)

contribuições referentes a esta categoria. Recorrentemente, estas metodologias diferentes refletem diferenças na definição do problema. Dependendo da definição, esta categoria de impacto somente dispõe de recursos naturais, saúde humana e o ambiente natural como área de proteção (CML, 2001).

Para um dado recurso  $i$ , a depleção abiótica é definida como a razão entre a quantidade de recursos extraídos ( $m_i$ ) e as reservas recuperáveis desse recurso ( $M_i$ ):

$$\text{Depleção abiótica} = \sum_i \frac{m_i}{M_i} \quad (II)$$

Produz um resultado com indicador adimensional. As unidades usadas tanto para extrações quanto para reservas podem ser livremente selecionadas, desde que seja consistente para um determinado recurso. Minérios são normalmente expressos em kg e gás natural em  $m^3$ , embora MJ possa ser usado como uma alternativa. A depleção abiótica também abrange a depleção de algum recurso energético, tal como combustíveis fósseis (HEIJUNGS R. , et al., 1992).

De acordo com Guinée e Heijungs (1995), o método baseado em reservas finais e taxas de extração é a melhor opção. Como a noção de “reservas econômicas” envolve uma variedade de considerações econômicas não diretamente relacionadas com o problema ambiental de depleção de recursos, ‘reservas finais’ é dada como o critério mais apropriado. No método proposto o indicador de resultado é expresso em kg de um recurso de referência (antimônio):

$$\text{Depleção abiótica} = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (III)$$

Com:

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}} \quad (IV)$$

Onde:

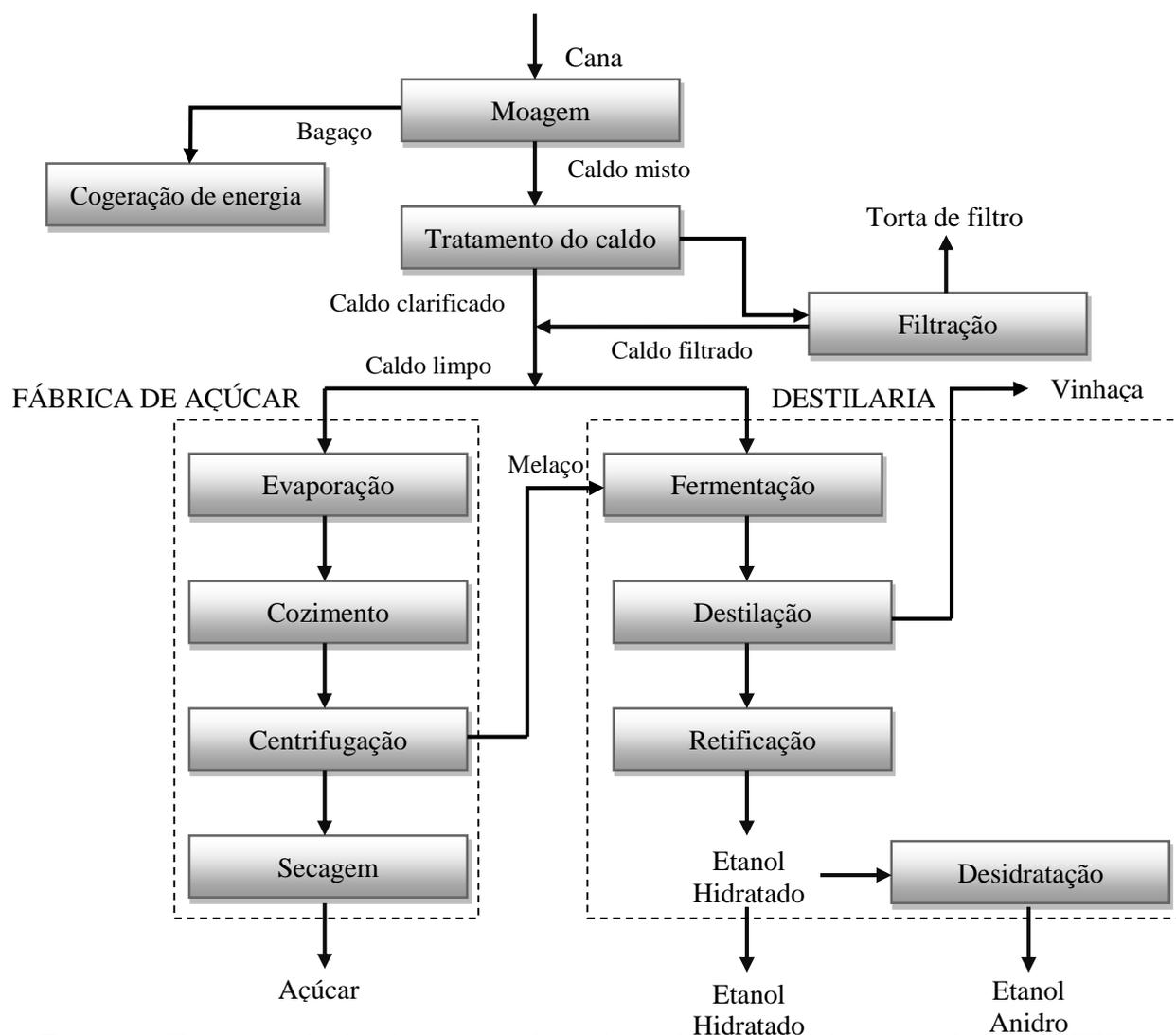
- $ADP_i$  = potencial de depleção abiótica do recurso  $i$  (geralmente adimensional)
- $m_i$  = quantidade de recurso  $i$  extraído (kg)
- $R_i$  = reserva final do recurso  $i$  (kg)
- $DR_i$  = taxa de extração de recurso (kg.yr<sup>-1</sup>)
- $R_{ref}$  = reserva final do recurso de referência, antimônio (kg)

Como discutido anteriormente, pode ser relevante a um estudo adicionar informações sobre a quantidade total de energia (fossil) consumida por um sistema. Uma abordagem

comum é simplesmente agregar todas as formas de consumo de energia, multiplicando os recursos energéticos extraídos do ambiente pelo seu respectivo poder calorífico superior, sendo esta a melhor indicação da extensão em que a fonte de energia é realmente esgotada. Frischknecht *et al.* (1998) propôs incluir não somente combustíveis fósseis mas também biocombustíveis, energia eólica e solar, bem como recursos nucleares (urânio, etc). Estes recursos energéticos obviamente não podem ser agregados com base no poder calorífico somente. Para a avaliação adicional de recursos de energia em MJ, deve se tomar o devido cuidado para evitar a dupla contagem na etapa de ponderação.

## 5 - PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL E AÇÚCAR

A configuração industrial mais adotada no Brasil (Figura 4) é a destilaria de etanol anexa<sup>8</sup> à usina de açúcar devido às grandes vantagens decorrentes da produção simultânea desses dois produtos. Frequentemente, a alta volatilidade de mercado no setor sucroalcooleiro exige que os investidores estejam preparados à necessidade de adequação às variações de demanda (MACEDO, SEABRA, & SILVA, 2008).



**Figura 4** - Fluxograma básico do processo de produção de etanol e açúcar (adaptado de CORTEZ *et al.*, 2010).

No presente estudo, considerou-se uma destilaria anexa localizada no município de Goianésia-GO, a Jalles Machado S/A, de modo que as avaliações dos fluxos de energia e massa puderam ser analisados a partir de um modelo global ou fragmentado, ou seja, caracterizou-se os processos que envolvem a produção de etanol e açúcar de forma acoplada

<sup>8</sup> Destilarias anexas: que produzem álcool também a partir do produto da fermentação do melão, subproduto da produção de açúcar, o chamado mosto de melão (OMETTO, 2005).

ou desconectada entre si. A qualidade de análise se deu a partir da definição clara dos sistemas de controle<sup>9</sup> analisados e considerando as questões de alocações de cargas ambientais nas etapas industriais que envolvem consumo de energia e de massa, preço de mercado, equipamentos e insumos. A seguir será relacionada uma descrição detalhada de cada etapa envolvida no processo industrial de obtenção do etanol e açúcar da cana.

## **5.1 - Recepção, preparo e extração do caldo**

A unidade industrial de recepção, preparo e extração do caldo é responsável pelo condicionamento da cana por meio da limpeza e abertura das células para que a extração do caldo seja eficiente, visando a mínima perda de açúcares, além da redução da umidade final do bagaço. Nesta unidade, análises de qualidade, tais como: propriedades da fibra, pureza do caldo e teor de sacarose (UNICAMP & CGEE, 2009) são imprescindíveis para avaliação da qualidade do caldo e potencial para a obtenção de etanol e açúcar. Essa seção é composta por uma infinidade de equipamentos pesados e transportadores de bagaço e cana, por isso, é essencial que haja otimização da sequência de operações de forma que os equipamentos possuam alto desempenho e atuem harmonicamente.

A gestão eficaz desse setor é um fator altamente relevante para uma usina devido à elevada influência na eficiência de obtenção dos produtos finais, consumo de água e energia, além dos altos custos de implantação, operação e manutenção (LEAL, 2010). A seguir serão realizadas breves descrições de cada etapa da unidade.

### **5.1.1 - Recepção**

Após a colheita da cana, esta chega à usina com certa quantidade de terra e impurezas. Geralmente, quando a cana é colhida manualmente e queimada, a lavagem é feita a fim de retirar as impurezas. Tais impurezas, se não são removidas, exercem papel negativo em todo o processo industrial, principalmente provocando desgaste das tubulações, bombas, aquecedores, registros, moendas, etc. Além disso, prejudicam a decantação do caldo e a filtração do lodo (RODRÍGUEZ, 2010).

A cana é colhida inteira a partir do corte manual e então é lavada para diminuição das impurezas na própria mesa de recepção, embora a lavagem afete seu processamento nas etapas posteriores (LEAL, 2010). A cana que é colhida mecanicamente é recebida na usina

---

<sup>9</sup> Sistema de controle: é definido como uma quantidade de massa fixa e identificável; as fronteiras do sistema se separam do ambiente. As fronteiras do sistema podem ser fixas ou móveis; contudo, não há transferência de massa através das mesmas (FOX & McDONALD, 2001).

na forma de talos picados. Neste caso o procedimento de lavagem não é realizado devido às elevadas perdas de sacarose. Por esse motivo, algumas usinas utilizam o sistema de limpeza a seco, onde a cana é limpa a partir de ventiladores ou exaustores (UNICAMP & CGEE, 2009).

A cana resultante do corte e limpeza mecanizada é descarregada diretamente em mesas alimentadoras de 45° ou 30° (LEAL, 2010) e transferidas para as esteiras de transporte que conduzem a cana para o setor de preparo, onde é submetida ao procedimento de nivelamento em picadores e desfibramento e abertura de células em desfibradores de martelos oscilantes (CGEE & BNDES, 2008). Esta etapa é essencial para o fornecimento de um colchão de cana contínuo e uniforme de forma a facilitar as operações de preparo e moagem (LEAL, 2010) .

### **5.1.2 - Preparo**

Após passar pela mesa de alimentação, a cana é transportada para os equipamentos de preparo, conduzidas por esteiras metálicas onde a camada de cana é nivelada e picada por dois conjuntos de facas rotativas que funcionam no sentido de rotação das esteiras (UNICAMP & CGEE, 2009).

O acionamento dos sistemas de facas rotativas e desfibradores que compõem a operação de preparo da cana é feita por turbinas à vapor ou motores elétricos (PELLEGRINI, 2009). Geralmente, as turbinas à vapor são de simples ou três estágios , cujos consumos específicos são da ordem de 13 a 16 kg/kWh, e atingem o máximo de 60 % de rendimento isoentrópico (PAYNE, 1989). Os motores elétricos utilizados são utilizados de acordo com as especificações mecânicas do sistema de preparo.

O desfibrador tem a função de completar o preparo da cana a partir do rompimento da maior quantidade possível de células. É composto de um rotor com martelos oscilantes que realiza o desfibramento da cana ao esfregá-la contra uma placa desfibradora que tem o formato curvo e acompanha o diâmetro do giro dos martelos. Assim, a cana é pulverizada e as células contendo açúcares são abertas, e o açúcar é extraído mais facilmente pelas moendas. Para obtenção de elevada eficiência de extração é necessário que pelo menos 82% das células estejam abertas (RAMOS, 2010). O tambor alimentador é responsável por forçar a passagem da cana entre os martelos e a placa desfibradora (LEAL, 2010).

Na saída do desfibrador, a altura do colchão de cana é uniformizada pelo espalhador. Este equipamento tem a função de descompactar a cana desfibrada para obtenção de uma camada fina e uniforme. A partir daí, a cana desfibrada é transportada por uma esteira de

borracha que passa por um eletroímã que retira qualquer material ferroso ou magnético que tenha vindo com a cana e que possa causar algum dano às estruturas de extração (MARQUES 2009). Para aumentar a capacidade de alimentação da moenda, a cana desfribada passa por uma calha que forma uma coluna com maior densidade e adentra a primeira etapa de moagem pressionada por gravidade. O nível da cana dentro da calha é utilizado para controlar o fluxo de cana para a moenda (UNICAMP & CGEE, 2009).

De acordo com Payne (1989), para se obter um bom preparo é necessário liberar a máxima quantidade possível do caldo proveniente da estrutura celular da cana de forma que não haja redução do tamanho da fibra, tal que a alimentação dos ternos da moenda seja comprometida. O indicador nomeado “índice de preparação” quantifica o grau de preparação da cana. Este é obtido a partir de ensaios que determinam o número de células abertas (PELLEGRINI, 2009), sendo cerca de 90% para a extração por moendas e 94 % por difusão (PAYNE, 1989). As peculiaridades desses sistemas serão descritas a seguir.

### **5.1.3 - Extração do caldo**

Essa etapa industrial consiste na separação física da fração líquida do colmo, contendo açúcares (caldo), da fração de fibra de cana (bagaço), com o máximo de eficiência possível (MARQUES, 2009). O processo de extração do caldo inicia-se logo após o preparo da cana. Este é então tratado e concentrado para ser destinado à produção de etanol e/ ou açúcar e tem como objetivo separar os materiais (PAYNE, 1989) de forma que recupere a máxima quantidade possível de caldo e produza o bagaço com a umidade adequada para uma queima satisfatória na caldeira (PELLEGRINI, 2009).

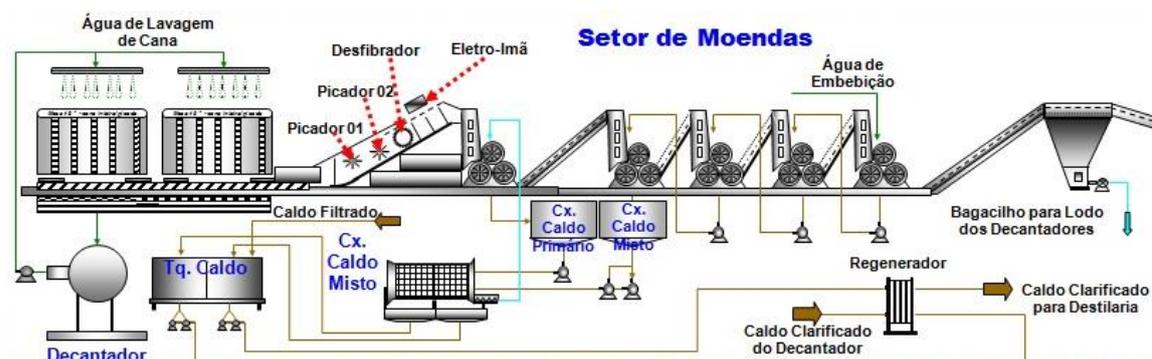
A obtenção de uma elevada capacidade de moagem e eficiência de extração são parâmetros primordiais no intuito de atingir alta produtividade nas usinas (LEAL, 2010), por isso, nos últimos anos, os seguintes componentes de projeto foram otimizados: calha Donnelly (alimentação por gravidade), embebição, rolos de pressão, eixos e castelos de moendas, esteiras e moendas e aplicação da automação (CTC, 1990).

A tecnologia padrão de extração, típica nos processos da indústria brasileira, é a moagem, que consiste em extrair o caldo por meio de fricção mecânica a partir de rolos de pressão e alimentação que submetem uma pressão mecânica à cana desfribada (MARQUES, 2009). A extração do caldo também pode ser feita via difusores ou em sistema de extração hidrodinâmica, entretanto esta tecnologia ainda não se consolidou no mercado.

### 5.1.3.1 - Moendas

A moagem é um processo de extração do caldo que consiste passar a cana entre dois rolos, com uma pressão pré-estabelecida (MARQUES, 2009). Trata-se de um processo de separação física em que a sacarose é separada das fibras vegetais por meio do esmagamento mecânico das células da cana, o que ocorre quando a cana desfibrada passa por conjunto de moendas denominadas ternos (PIACENTE, 2010).

O sistema de moendas (Figura 5) pode ser composto por 4 a 7 ternos em série, sendo um terno constituído de rolos de esmagamento. Esses são dispostos em triângulos de maneira que a fibra seja empurrada duas vezes na entrada e na saída do terno. O controle da capacidade de moagem é feito em função da abertura entre o rolo de entrada (fixo) e o rolo superior, cuja posição é estabelecida por um regulador de pressão hidráulica entre o rolo superior e o rolo de saída. A quantidade de fibra que passa pela moenda na unidade de tempo é o parâmetro utilizado para a regulação da abertura (PELLEGRINI, 2009).



**Figura 5** - Fluxograma do processo de extração do caldo (USINA SANTA ELISA, 2011).

Normalmente, o caldo extraído no primeiro terno é enviado para a fábrica de açúcar (por ser de melhor qualidade) e o restante do caldo vai para a destilaria. A eficiência de extração de açúcares varia entre 94,0 a 97,5% e a umidade final do bagaço fica em torno de 50% (UNICAMP & CGEE, 2009).

Com o objetivo de aumentar a diluição do caldo e aumentar a extração do caldo no terno seguinte utiliza-se a embebição. Trata-se de um processo no qual a água ou caldo é aplicado sob a forma de aspersão, jatos pressurizados ou bicas de embebição (CAMARGO & USHIMA, 1990). De acordo com Hugot (1986), o valor ótimo de embebição está na faixa de 2 kg de água por kg de fibra na cana. A embebição é tradicionalmente realizada à temperatura ambiente, porém há autores que sugerem a utilização de água quente (cerca de 80°C) (PAYNE, 1989).

### 5.1.3.2 - Difusores

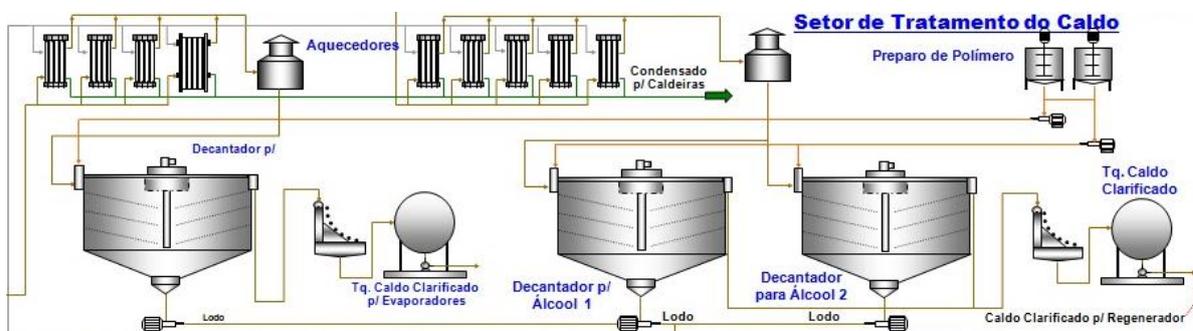
Na difusão, o caldo é extraído da cana desintegrada por um fluxo contracorrente de água. Esse processo ocorre de duas maneiras distintas. Parte do caldo é extraída por meio de um processo de lavagem (lixiviação) (PIACENTE, 2010) e outra parte do caldo é extraída por meio de um processo de troca físico-química causado por pressão osmótica e difusão celular (PELLEGRINI, 2009).

Após o difusor, o bagaço é enviado para uma prensa para o deságue, originando o caldo de retorno. Para difusão, a água de embebição e do caldo de retorno da prensa devem ser mantidos a 80°C a fim de evitar o desenvolvimento de microorganismos (PROCKNOR, 2001). É possível atingir valores maiores de eficiência de recuperação (9% no máximo) na difusão para quantidades de água acima de 300 kg/t cana (PELLEGRINI, 2009).

## 5.2 - Tratamento do caldo

Após sair da fase de extração, o caldo de cana deve ser tratado para remoção das impurezas existentes em sua composição para que possua qualidade adequada para seu processamento subsequente. Para isso, o tratamento do caldo deve ser realizado de forma que sejam removidas substâncias dissolvidas e materiais insolúveis (PELLEGRINI, 2009). Desta forma se faz necessária a correção do pH, a fim de evitar a inversão e decomposição da sacarose (UNICAMP & CGEE, 2009), resultando em perdas mínimas durante os processos subsequentes (PELLEGRINI, 2009).

De acordo com Cortez *et al* (2008), o tratamento do caldo baseia-se na eliminação de impurezas grosseiras, tais como bagacilho e areia, eliminação de partículas coloidais, preservação de vitaminas, açúcares e aminoácidos e eliminação de contaminantes microbianos. A Figura 6 mostra o funcionamento dessa etapa.



**Figura 6** - Descrição básica do processo de tratamento do caldo (USINA SANTA ELISA, 2011).

Embora os tratamentos para etanol e açúcar sejam semelhantes, existem algumas diferenças nos procedimentos de obtenção de caldo para produção de açúcar e etanol. O caldo para açúcar, sofre um procedimento mais rigoroso com a utilização de mais produtos químicos, visando separar, além de sólidos, corantes ou percussores de cor (CGEE & BNDES, 2008). Primeiramente, o caldo passa por uma etapa de tratamento físico para que seja realizada a remoção dos sólidos insolúveis (basicamente areia, argila e bagacilho), cerca de 0,1% e 1,0%, por meio de peneiras. Posteriormente, o caldo é submetido a tratamento químico, removendo as impurezas coloidais e solúveis, além de impurezas insolúveis que não foram eliminadas no peneiramento. Esta segunda etapa é composta pelos processos subsequentes de coagulação, floculação e precipitação, sendo as impurezas precipitadas eliminadas por sedimentação (CORTEZ *et al*, 2008).

### **5.2.1- Caldo para produção de etanol**

O caldo proveniente da extração na moenda, contendo 10 a 19% de açúcares (CORTEZ *et al*, 2008), é peneirado e separado do bagacilho. Este então retorna à moenda ou é filtrado para a separação do lodo. O caldo peneirado é pré-aquecido e seu pH é elevado com hidróxido de sódio (leite de cal) (para 6,0 ou mais), levando a formação de flocos. Posteriormente, o caldo é aquecido até a temperatura de ebulição para que os gases sejam separados ao passar por balões *flash*<sup>10</sup>.

Para auxiliar na decantação e clarificação, são adicionados ácido fosfórico e polímeros, onde o caldo permanece em repouso de 40 minutos a 2 horas (CORTEZ *et al*, 2008). O caldo clarificado é retirado como sobrenadante livre de microorganismos e o precipitado, o lodo contendo uma grande quantidade de impurezas compostas por os sais de cálcio (magnésio e fosfato), matéria orgânica coagulada (proteínas e polissacarídeos) e fibras arastadas pelos flocos é removido também do processo (CORTEZ *et al*, 2008).

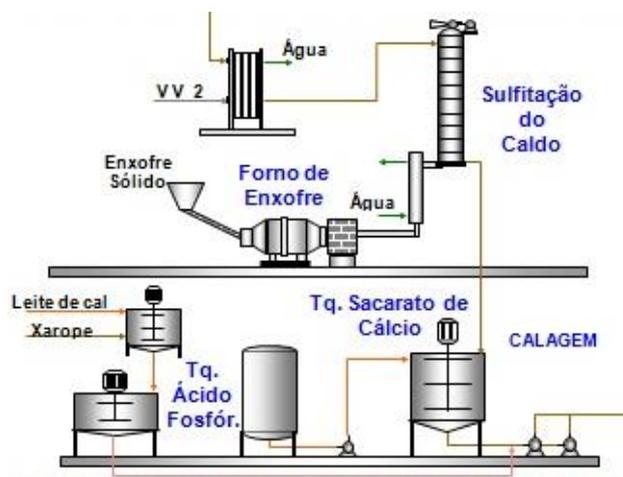
### **5.2.2 - Caldo para produção de açúcar**

Para a produção de açúcar, o caldo é inicialmente peneirado e tratado quimicamente por coagulação, floculação e precipitação das impurezas, que são eliminadas por decantação (CGEE & BNDES, 2008).

---

<sup>10</sup> São recipientes cilíndricos colocados imediatamente antes e acima do decantador, com uma chaminé aberta para a atmosfera e ao qual o caldo vindo dos aquecedores, chega tangencialmente. Os balões de *flash* utilizados para que os gases formados no aquecimento sejam retirados, pois arrastam partículas de sujeiras (PELLEGRINI, 2009).

Uma peculiaridade é a etapa de sulfitação (Figura 7), responsável por inibir reações que causam formação de cor, coagulação de colóides solúveis e formação do precipitado de sulfito de cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ). Além disso, esse processo tem como objetivo diminuir a viscosidade do caldo, facilitando as operações de evaporação e cozimento (UNICAMP & CGEE, 2009).



**Figura 7** – Funcionamento básico do processo de sulfitação (USINA SANTA ELISA, 2011).

O caldo tratado é concentrado em evaporadores e cozedores para cristalização do açúcar. Neste processo, nem toda a sacarose disponível na cana é cristalizada e o mel (solução residual rica em açúcar) pode retornar mais de uma vez ao processo com o propósito de recuperar mais açúcar. O mel final (melaço), que não retorna ao processo de fabricação de açúcar, pode ser utilizado como matéria-prima na fermentação por ser rico em açúcares redutores e sacarose (CGEE & BNDES, 2008).

### 5.2.3 - Torta de filtro

O lodo decantado é submetido à filtração para a recuperação do caldo a partir da utilização de filtros rotativos à vácuo (PELLEGRINI, 2009). Neste processo, os sólidos são concentrados e lavados com água condensada. O caldo proveniente dessa lavagem é então reciclado ou enviado para nova decantação (CORTEZ *et al*, 2008).

O líquido resultante da filtração retorna ao processo e o resíduo sólido, a torta de filtro, é misturada com outros resíduos e compostada (CORTEZ *et al*, 2008) para ser destinada à fertilização nos campos de cultivo da cana-de-açúcar (OMETTO, 2005). O funcionamento detalhado do processo de obtenção da torta de filtro é mostrado na Figura 8.



**Figura 8** – Fluxograma esquemático do processo de produção de torta de filtro (USINA SANTA ELISA, 2011).

### 5.3 - Fermentação

O processo de fermentação mais comumente utilizado em usinas brasileiras é o Melle-Boinot<sup>11</sup>. Parte do caldo clarificado é misturado com o mel final proveniente da fabricação de açúcar, formando o mosto, o qual é enviado para as dornas de fermentação. O Brix<sup>12</sup> do caldo enviado às dornas varia entre 16 a 20°Brix e dependem da origem do mosto (PELLEGRINI, 2009).

O mosto é então misturado a leveduras (fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisiae*) e fermentado por um período de 8 a 12 horas, dando origem ao vinho (mosto fermentado, com uma concentração de 7 a 10% de etanol) (CGEE & BNDES, 2008). Tais microorganismos convertem a sacarose em etanol e dióxido de carbono (CORTEZ, LORA, & GÓMEZ, 2008), de acordo com a equação resumida abaixo:



De acordo com Cortez *et al* (2008), os principais equipamentos utilizados na fermentação são dornas de fermentação (são necessárias 7 a 10 m<sup>3</sup> de dornas por m<sup>3</sup> de álcool produzido por dia), trocadores de calor para resfriamento, tanques de tratamento de ácido, centrífugas (capacidade volumétrica correspondente à vazão média de vinho) e dorna volante (com volume igual ao da dorna de fermentação).

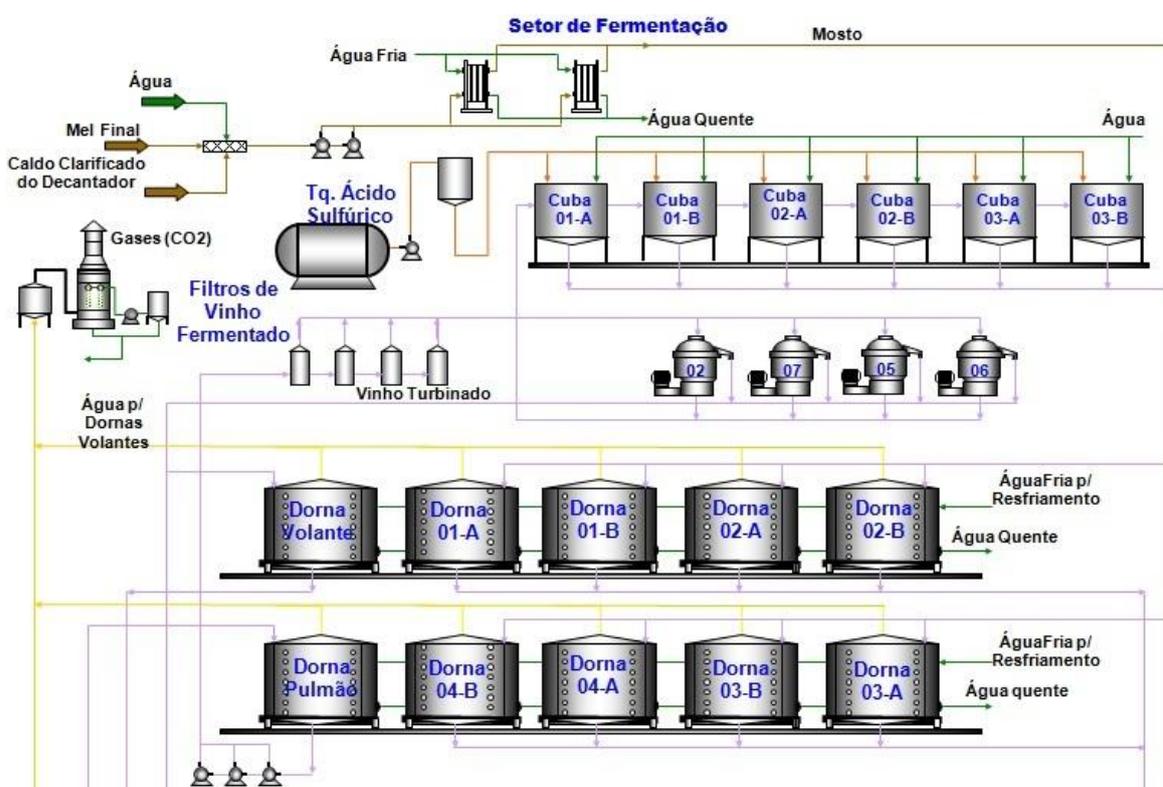
Durante a reação no interior das dornas, ocorre uma intensa liberação de dióxido de carbono e calor, dando origem a formação de produtos secundários como álcoois superiores,

<sup>11</sup>Processo Melle-Boinot: consiste na recuperação do levedo por centrifugação, cujo resíduo é enviado ao novo tanque de tratamento, sendo diluído com água, seguido da adição de ácido sulfúrico para correção do pH, ficando pronto para receber novo mosto.

<sup>12</sup>Brix é uma medida aproximada de teor de sólidos totais (CORTEZ, LORA, & GÓMEZ, 2008). [

glicerol, aldeídos, etc. Para manter a temperatura da dorna entre 32 e 35°C. são instaladas serpentinas com circulação de água em seu interior (PELLEGRINI, 2009).

O vinho é enviado às centrífugas para a recuperação da levedura, que depois retorna às cubas para tratamento. A recuperação das leveduras se faz com centrífugas de alta eficiência capazes de concentrar 65% em volume, estando prevista a centrifugação sequencial em duas etapas com diluição intermediária da levedura com água (UNICAMP & CGEE, 2009). A fase menos densa da centrifugação (vinho delevedurado) é enviada para as colunas de destilação. O teor alcoólico do vinho produzido é de 9°GL<sup>13</sup> e o rendimento estequiométrico da fermentação é de aproximadamente 91% (PELLEGRINI, 2009). A Figura 9 mostra as etapas do processo fermentativo.



**Figura 9** – Etapas do processo fermentativo (USINA SANTA ELISA, 2011).

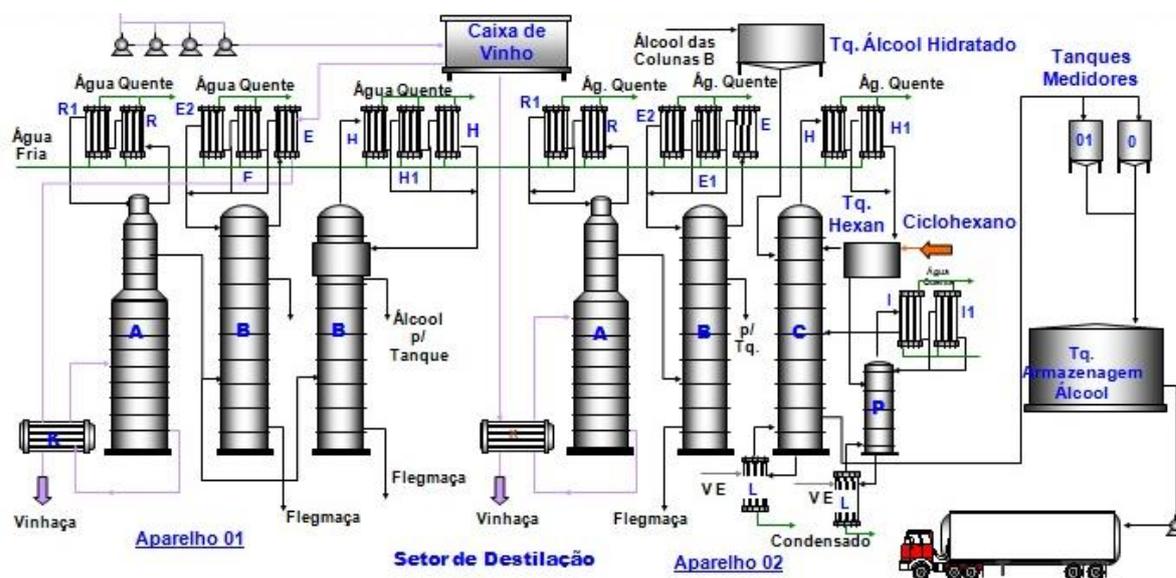
#### 5.4 - Destilação e desidratação

O princípio da destilação se baseia na diferença entre o ponto de ebulição da água (100°C) e do etanol (78,4°C). A mistura água e etanol apresenta ponto de ebulição variável em função do grau alcoólico. Assim, o ponto de ebulição de uma solução hidroalcoólica é

<sup>13</sup> Gay Lussac (°GL= %V) = quantidade em mililitros de etanol absoluto contida em 100 mililitros de mistura água-etanol.

intermediário entre aquele da água e do álcool e será tanto mais próximo deste último quanto maior for o grau alcoólico da solução (EMBRAPA, 2008).

Uma mistura hidroalcoólica (álcool e água) com teor alcoólico mínimo de 92,6° GL, o etanol hidratado, pode ser estocado como produto final ou pode ser enviado para a coluna de desidratação para obtenção de etanol anidro. Mas, como se trata de uma mistura azeotrópica<sup>14</sup>, seus componentes não podem ser separados por uma simples destilação. A Figura 10 mostra o padrão de destilaria utilizada no Brasil.



**Figura 10** - Fluxograma esquemático do processo de destilação de desidratação com ciclohexano (USINA SANTA ELISA, 2011).

A fim de se obter etanol anidro, é ainda necessário desidratar o etanol hidratado, seja por meio de uma coluna operando com ciclohexano (destilação extrativa) ou em peneiras moleculares. A concentração final do etanol anidro atinge 99,7°GL. Esses sistemas necessitam de vapor de baixa pressão<sup>15</sup> (para o agente desidratante ciclohexano) ou vapor de média pressão<sup>16</sup> (peneira molecular) (PELLEGRINI, 2009).

<sup>14</sup>Mistura azeotrópica é uma mistura de duas ou mais substâncias que, a uma certa composição, possui um ponto de ebulição constante e fixo, como se fosse uma substância pura.

<sup>15</sup> Vapor de baixa pressão: até 10 kgf./cm<sup>2</sup> (BIZZO).

<sup>16</sup> Vapor de média pressão: de 11 a 40 kgf./cm<sup>2</sup> (BIZZO).

#### **5.4.1 - Obtenção de etanol hidratado**

Conforme mostrado na Figura 10, o etanol no vinho é recuperado pelo processo de destilação, o qual utiliza os diferentes pontos de ebulição das diferentes substâncias voláteis para promover a separação. O vinho é enviado para a Coluna A, na qual a chamada flegma (50°GL) é obtida, é separada em três partes: a coluna de epuração (onde o vinho é alimentado), responsável pela eliminação das impurezas; a coluna de concentração do álcool de segunda (produto de topo); e a coluna de esgotamento do vinho (parte inferior). A flegma, produto com impureza, segue para a coluna B, chamada de Coluna de Retificação, onde a concentração da mistura atinge 96°GL. Essa coluna ainda produz o óleo fúsel, composto de produtos secundários da fermentação (PELLEGRINI, 2009).

A energia necessária para a operação dessas colunas é fornecida por vapor de baixa pressão por meio da troca direta (borbotagem) ou indireta (uso do refulvador). Além do flegma, a destilação do vinho também gera a vinhaça. O flegma é destilado novamente resultando na flegmaça, que é utilizada para assepsia dos equipamentos. As quantidades de vinhaça e flegmaça formadas variam entre 9 a 15 L /L de etanol (flegmaça mais vinhaça) dependendo do tipo de troca com vapor (PELLEGRINI, 2009).

De acordo com Oliveira (2010), a maioria dos equipamentos no Brasil utilizam a borbotagem (uso direto) do vapor vegetal (vapor de água obtido por evaporação da água do caldo de cana) na destilação, cujo vapor vegetal se condensa em contato com o vinho dentro do aparelho de destilação resultando em um aumento da vinhaça gerada. A riqueza alcoólica da vinhaça deve ser nula, porém nela se acumulam todas as substâncias fixas do vinho, bem como substâncias voláteis. A vinhaça é direcionada à uma lagoa para armazenamento e distribuída por tubulação para ser utilizada na fertirrigação da cana-de-açúcar.

Nas destilarias brasileiras, existem em operação unidades pequenas, com capacidade na faixa de 50.000 a 150.000 L/ dia, até unidades grande capacidade, próximas a 800.000 litros/dia, mas grande parte têm capacidade em torno de 300.000 litros/ dia. O consumo de vapor nas unidades de etanol hidratado oscila na faixa de 1,8 a 2,6 kg vapor / litro de etanol produzido, variando com o teor alcoólico do vinho alimentado ao processo e com o número de bandejas das colunas de destilação empregadas (CORTEZ *et al*, 2008).

#### **5.4.2 - Obtenção de etanol anidro**

A tecnologia mais utilizada no Brasil para a obtenção de etanol é a desidratação pela adição do ciclohexano, formando uma mistura azeotrópica ternária, com ponto de ebulição inferior ao do etanol anidro. Na coluna de desidratação, o ciclohexano é adicionado no topo,

e o etanol anidro é retirado no fundo, com aproximadamente 99,7° GL ou 0,4% de água em peso. A mistura ternária retirada do topo é condensada e decantada, enquanto a parte rica em água é enviada à coluna de recuperação de ciclohexano (CGEE & BNDES, 2008). No passado, o benzeno era utilizado como agente desidratante, mas em função da proibição do seu uso, por tratar-se de composto carcinogênico, ele foi substituído pelo ciclohexano (CORTEZ, LORA, & GÓMEZ, 2008).

Utilizam-se outros dois processos industriais de desidratação do etanol, a peneira molecular e a destilação extrativa utilizando etilenoglicol como agente desidratante.

A desidratação com peneiras moleculares é o procedimento que melhor se adapta à alta escala de produção e que conta com a vantagem adicional do baixo consumo de vapor por litro de etanol (UNICAMP & CGEE, 2009). A peneira molecular trata-se do único método que emprega sólidos porosos, denominados zeólitas, os quais, em função de sua estrutura porosa e grande área superficial, são capazes de aprisionar as moléculas menores de água, purificando o etanol hidratado alimentado (CORTEZ, *et al*, 2008).

O processo menos utilizado é a desidratação com peneira molecular, responsável por menos de 10 % da produção nacional. A destilação azeotrópica responde por quase 70 % do total de etanol anidro produzido no Brasil. O método de destilação extrativa com etileno glicol é responsável por aproximadamente 25% da produção nacional de etanol anidro (CORTEZ *et al*, 2008).

## **5.5 - Fábrica de açúcar**

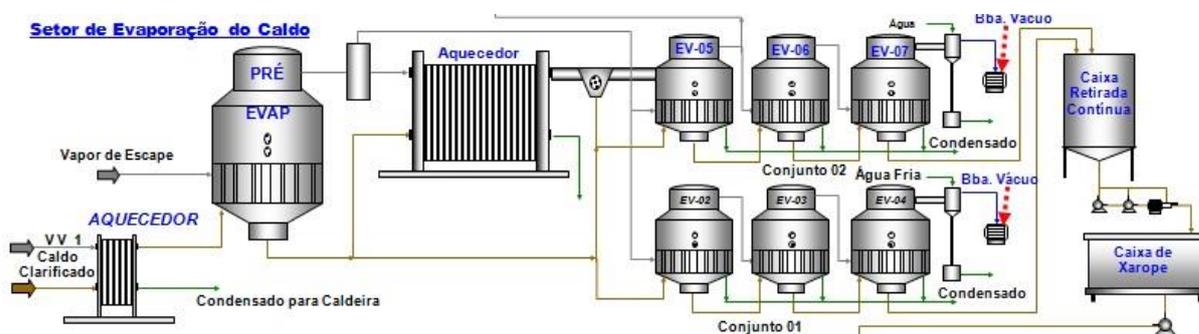
No Brasil são produzidos basicamente dois tipos de açúcar, o açúcar bruto e o cristal branco. O açúcar bruto possui menor grau de pureza e é exportado como matéria prima para refinarias, já o cristal passa por um processo de clarificação mais minuciosa proporcionando-lhe melhor qualidade. De maneira geral a produção do açúcar, seja bruto ou cristal, divide-se nas operações de evaporação, cozimento, cristalização complementar e centrifugação (PIACENTE, 2010).

Além do açúcar cristal e do açúcar refinado, têm surgido no âmbito da indústria canavieira produtos adoçantes diferenciados, com melhores preços para o produtor, e que atingem segmentos específicos do mercado consumidor. Esse é o caso do açúcar orgânico, produzido sem agroquímicos ou aditivos artificiais, e dos açúcares mesclados com adoçantes de baixas calorias, como o aspartame ou a sucralose, produzida com base na própria sacarose da cana-de-açúcar (CGEE & BNDES, 2008).

### 5.5.1 - Evaporação

O processo de evaporação é o primeiro estágio de concentração de caldo clarificado proveniente da planta de tratamento que passa por um processo de concentração para eliminação da água e produção dos cristais de açúcar (PELLEGRINI, 2009). Sua principal função é a concentração de caldo com 14 a 17°Brix até uma concentração de 60 a 70 °Brix, conhecida como xarope (CAMARGO & USHIMA, 1990).

Após a decantação, o caldo para açúcar passa por uma série de evaporadores (Figura 11). O primeiro pressurizado e os restantes a vácuo crescente, retirando a água do caldo e aumentando a concentração de sacarose (CORTEZ *et al*, 2008).



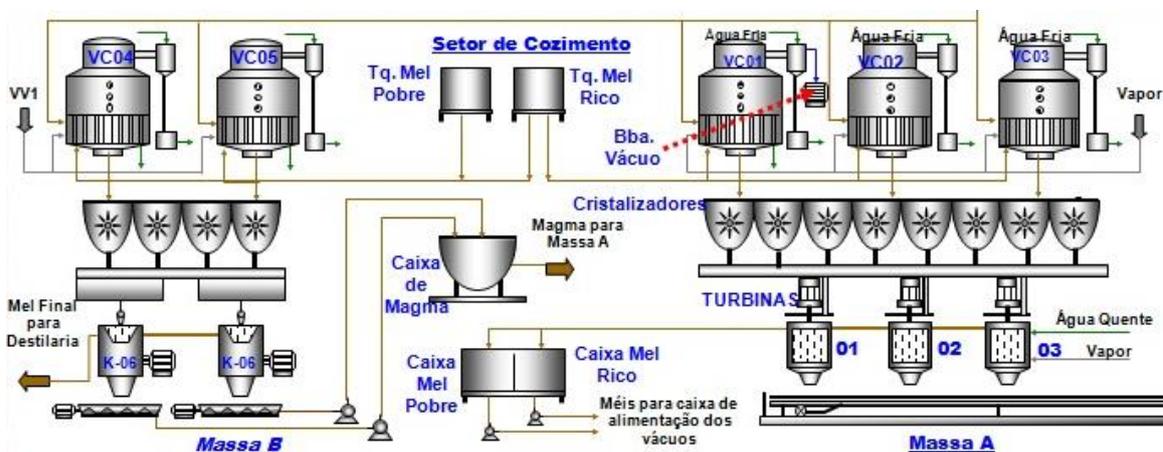
**Figura 11** – Fluxograma esquemático do setor de evaporação do caldo (USINA SANTA ELISA, 2011).

Nas usinas brasileiras, o sistema de evaporação de múltiplos-efeitos (múltiplas evaporações) correntes paralelas, ou seja, tanto caldo como vapor são alimentados no 1° efeito seguindo paralelos até o último efeito. O tipo de evaporador mais comum na indústria brasileira de açúcar e etanol é o de tubo vertical com fluxo ascendente, construído em aço carbono. O corpo é formado por um cilindro vertical que se eleva sobre a calandra circular, efetuando a troca de calor (HUGOT, 1986; CAMARGO & USHIMA, 1990).

O processo de evaporação do caldo de cana é o principal consumidor de vapor de escape das turbinas de uma usina sucroalcooleira. Este processo é responsável pela “produção” do vapor vegetal utilizado nos mais diversos processos de aquecimento do processo produtivo (tratamento do caldo, cozimento, destilação, dentre outros. Assim, pode-se dizer que este processo é o responsável pela integração entre a planta de utilidades (processos auxiliares à usina) e o processo em uma usina (PELLEGRINI, 2009). Logo, a maximização do desempenho da planta de utilidades deve levar em consideração modificações que reduzam o consumo de vapor de escape

### 5.5.2 - Cozimento

Na produção de açúcar, o xarope proveniente da evaporação passa por flotasores, para a retirada de outras impurezas, seguindo posteriormente para a etapa de cozimento. São utilizados equipamentos denominados cozedores (tachos ou cristalizadores), semelhantes às caixas dos evaporadores, que trabalham individualmente sob vácuo e de forma descontínua ou contínua. A evaporação de água dá origem a uma mistura de cristais envolvidos em mel que recebe o nome de massa cozida (PIACENTE, 2010). A massa com cristais é descarregada em cristalizadores, onde é resfriada, e os cristais, em seguida, são separados em peneiras centrífugas contínuas (CORTEZ, LORA, & GÓMEZ, 2008). A Figura 12 mostra o fluxograma esquemático do setor de cozimento.



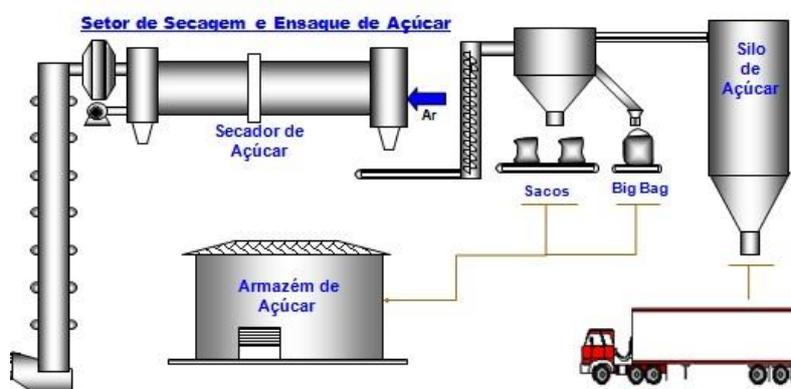
**Figura 12** – Fluxograma esquemático do setor de cozimento (USINA SANTA ELISA, 2011).

A massa proveniente da segunda separação dos cristais é chamada de melaço (ou mel rico) e vai para tanques de armazenamento e, de lá, para a mistura com o caldo e a água, formando o que chamamos de mosto (CORTEZ, LORA, & GÓMEZ, 2008).

### 5.5.3 - Centrifugação

A massa cozida com cristais e mel é submetida a uma centrifugação e os cristais de açúcar separados, secados e armazenados. O mel proveniente da massa de menor pureza denominado de melaço ou mel final é enviado para a destilaria para a produção de etanol, ou comercializado como subproduto *in natura* (PIACENTE, 2010). O mel removido é coletado em um tanque e retorna aos cozedores para recuperação do açúcar dissolvido ainda presente, até que se atinja um maior esgotamento do mesmo (PELLEGRINI, 2009).

Os produtos finais desse processo são os cristais de açúcar e o mel residual (PELLEGRINI, 2009). Pode-se misturar o mel com o xarope e encaminhá-los novamente para a cristalização e centrifugação. Como última etapa do processo de fabricação de açúcar, os cristais são levados por esteiras transportadoras ao secador onde recebem ar quente. O produto desta etapa pode ser comercializado desta forma ou seguir para a fabricação de outros produtos, como o açúcar invertido, o açúcar refinado ou o açúcar líquido. Como o açúcar extraído nas centrífugas tem um elevado grau de umidade, ele é enviado para os secadores antes de ser ensacado (PELLEGRINI, 2009). Após a secagem (Figura 13), o açúcar é armazenado (MARQUES, 2009).



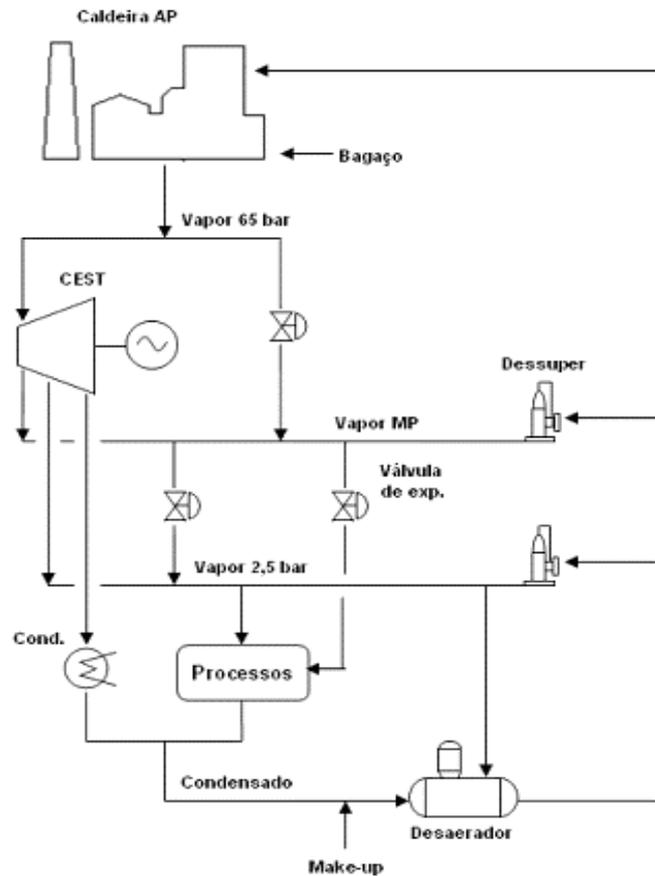
**Figura 13** – Secagem, ensaque e transporte de açúcar (USINA SANTA ELISA, 2011).

## 5.6 - Cogeração de energia

O sistema de cogeração de energia é basicamente constituído de caldeiras que queimam bagaço (podendo adicionar palha), turbinas de contrapressão de acionamento de turbogeradores de energia elétrica e dos equipamentos mais pesados, como moendas, desfibradores, picadores, exaustores e bombas de água de alimentação das caldeiras. O vapor de saída das turbinas de contrapressão, com pressão em torno de 2,5 bar, é encaminhado para o processo para suprir a demanda por energia térmica (LEAL, 2010).

A produção de electricidade é uma importante fonte de receitas na indústria de açúcar e etanol (JAVALAGI *et al*, 2010). Para otimização da indústria de cana, vários fatores ajudam na produção de excedentes de electricidade como as porcentagens de bagaço de cana, de fibra de cana, de umidade do bagaço, a eficiência da caldeira, o consumo de vapor de processo e consumo de energia elétrica na moagem (CHOHFI, 2004). Para a geração de energia elétrica na indústria do açúcar, os combustíveis básicos são o petróleo, o carvão, o gás, a energia hídrica, bagaço e casca de arroz (AL-AMIN *et al*, 2009).

A Figura 14 apresenta o esquema usualmente adotado para o sistema de cogeração na agroindústria canavieira (SEABRA, 2008). Em síntese, utilizando o calor liberado pela combustão do bagaço nas caldeiras, produz-se vapor de alta pressão, utilizado em turbinas a vapor para geração de energia elétrica e acionamentos mecânicos, cujo vapor de escape, abaixo pressão, atende aos usos térmicos (CGEE & BNDES, 2008). Embora o bagaço seja o principal combustível na agroindústria, pretende-se também utilizar a palha para este fim.



**Figura 14** – Sistema de cogeração típico de usinas brasileiras (SEABRA, 2008).

### 5.6.1 - Biomassa de cana-de-açúcar

A disponibilidade de biomassa da cana-de-açúcar pode chegar a 900 kg/tcana se toda a palha e pontas forem recuperadas do campo. A quantidade de bagaço não varia muito e está na faixa do valor de 270 kg/tcana. A capacidade de recuperação das palhas e pontas no campo é de, no máximo, 30% do total, resultado em um total de biomassa disponível como insumo energético de 425 kg /tcana (NETO, 2001).

### 5.6.1.1- Bagaço

O bagaço é uma biomassa fibrosa constituída por 50-60 % de celulose, 20-25 % de hemicelulose e 20-25 % de lignina (CAMARGO *et al.*, 1990), e com uma umidade de cerca de 50% (PRIETO, 2003). Uma parcela gerada no sistema de extração é enviada para a planta de utilidades, onde é queimado nas caldeiras, sendo uma parte armazenada como reserva técnica (PELLEGRINI, 2009).

Além das usinas, o bagaço é amplamente utilizado como combustível em outras indústrias localizadas nas proximidades. Além de servir como combustível, pode ser utilizado como ração animal e na produção de celulose, papel, aglomerados e chapas semelhantes à madeira (CAMARGO *et al.*, 1990). Ainda, nos últimos anos tem-se desenvolvido a indústria de pellets para serem utilizados como combustível em outras indústrias (PELLEGRINI, 2009).

A Tabela 1 mostra que o bagaço apresenta um elevado conteúdo de voláteis, quando comparado a outros tipos de combustíveis, fator a ser considerado durante a sua queima total e gaseificação, além de apresentar baixo teor de carbono fixo (C fixo) (NETO, 2001).

**Tabela 1** – Composição Imediata, Elementar e Poder Calorífico do Bagaço de Cana, Camargo *et al* (1990).

Composição Imediata (% massa, base seca)			Composição Elementar (% massa, base seca)				Poder Calorífico (MJ/kg, base seca)	
C fixo	Voláteis	Cinzas	C	H	O	S	Superior	Inferior
13	83	4	46,3	6,4	43,3	<10	18,9	17,5

### 5.6.1.2 - Palha

Há grande variação no teor de umidade entre os componentes da palha colhida (2,7% nas folhas secas, a 84,9% nos ponteiros). Teores de cinzas, voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior variam muito pouco. A variedade de cana e o número do corte não afetam os valores obtidos para poder calorífico superior nem os da composição imediata, mas há influência nos teores de álcalis, fósforos e cálcio (NETO, 2001).

A caracterização da palha e pontas da cana-de-açúcar para uso como combustível foi realizada pela COPERSUCAR (1998). A análise da palha foi realizada em seus três componentes: folhas verdes, folhas secas e ponteiros e mostrou que seus componentes apresentam diferenças importantes em umidade, teor de álcalis e outras características, mesmo sendo semelhantes na composição básica de celulose, hemicelulose e lignina. Fatores

como a variedade de cana, idade, número de cortes, e do uso ou não de vinhoto na fertirrigação e do campo exercem influência importante nas características. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Propriedades da palha e pontas de cana-de-açúcar, COPERSUCAR (1998).

Material	Composição Imediata (% m/m)				PCS*
	Cinza *	MJ/kg	Carbono *	Umidade	MJ / kg
Folhas secas	3,3	85,8	10,8	11,3	17,36
Folhas verdes	3,2	85,2	11,7	66,7	17,38
Ponteiros	4,3	84,1	11,6	82,5	16,27

\* Base seca

### 5.6.2 - Geração de eletricidade e vapor

Os sistemas de cogeração utilizados na maioria das usinas são baseados em caldeiras de geração de vapor a 1 bar e turbinas de contrapressão (escape a 2,5 bar). Aproximadamente, 50% do vapor necessário no processo é expandido nas turbinas de acionamento das moendas, cuja eficiência isoentrópica<sup>17</sup> é inferior a 60% (consumo específico entre 14 a 16 kg/kWh) (PELLEGRINI, 2009).

Após a extração do caldo, o bagaço, constituído de fibra (46%), água (50%) e sólidos dissolvidos (4%) é transportado por esteiras rolantes para as caldeiras, sendo o excedente enviado ao pátio de estocagem (UNICAMP & CGEE, 2009).

Segundo Leal (2010), a autosuficiência foi conseguida em meados da década de 1990, com as seguintes condições: vapor das caldeiras saindo a 22 bar/ 300°C; consumo de vapor no processo de 500 kg/tcana processada; energia mecânica nos aconamentos de 16 kWh/tcana; energia elétrica para a usina de 12 kWh/tcana e sobra de bagaço de 0 a 10 %.

Em condições típicas, as usinas brasileiras consomem como potência de eixo, no preparo e moagem da cana, cerca de 16 kWh/tcana, que se somam à demanda de energia elétrica, da ordem de 12 kWh por tonelada de cana (MACEDO et al, 2006). Assim, plantas com capacidade de geração acima de 28 kWh/tcana processada tipicamente passam a disponibilizar excedentes energéticos para a rede pública (CGEE & BNDES, 2008).

<sup>17</sup>Eficiência isoentrópica: é definida como a razão entre o salto entálpico real do vapor através da turbina e o salto entálpico teórico, se mantida a entropia constante (VAN WYLEN *et al*, 2003)

Apenas uma fração de energia primária do bagaço (585 kWh/tcana) é convertida em energia útil, de forma a atingir a energia de 28 kWh/tcana, eletromecânica), 330 kWh/tcana na térmica e 58 kWh/tcana com a sobra de bagaço (LEAL, 2010).

### 5.6.2.1- Caldeira

A eficiência das caldeiras tem aumentado pela adição de recuperadores de calor, como o pré-aquecedor de ar de combustão, economizadores de energia e pela melhoria da combustão com a introdução de ar secundário, automação, queima em suspensão e grelhas basculantes. O uso de turbinas multiestágio nos principais equipamentos, como picadores, desfibradores e moendas, ajudou a reduzir o consumo de vapor vivo desses acionamentos, sendo a sobra direcionada para os turbogeradores de eletricidade (LEAL, 2010). A Figura 15 mostra o diagrama esquemático do setor de caldeiras.



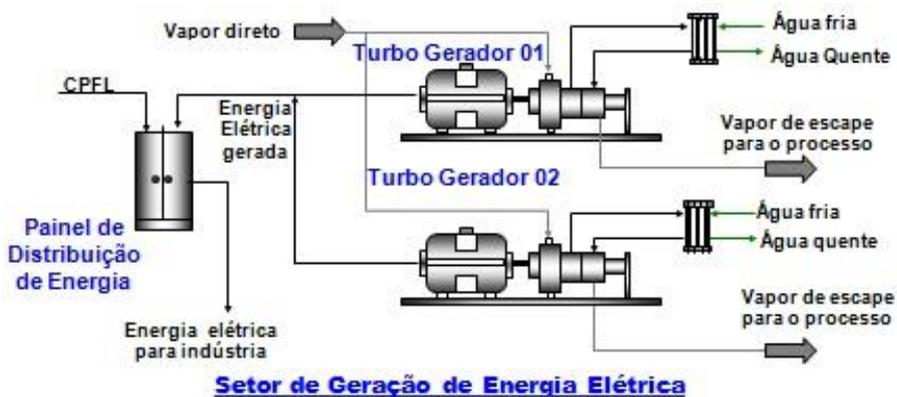
**Figura 15** – Diagrama esquemático do setor de caldeiras (USINA SANTA ELISA, 2011).

Os primeiros passos da modernização das caldeiras foram a introdução de pré-aquecedor de ar, economizador, superaquecedor, ar secundário, grelha basculante, triagem forçada e alguma automação. Essas mudanças contribuíram não só para o aumento da eficiência, mas também para o ganho de capacidade (LEAL, 2010). Hoje, a tecnologia de ponta oferecida no mercado nacional é constituída de caldeiras de vapor de até 400 t/h (DEDINI, 2009), com eficiência de 89 % (há oferta de equipamentos até 120 bar/ 540°C, mas que não estão em uso nas usinas) (LEAL,2010).

### 5.6.2.2 - Turbogeneradores

Os turbogeneradores (Figura 16) são equipamentos que requerem investimentos bem menores que as caldeiras. Apresentam vida útil mais curta e existe um mercado mais ativo

de componentes usados, facilitando a substituição mais rápida dos equipamentos obsoletos, mesmo antes do fim da vida útil (LEAL, 2010). A energia elétrica necessária é gerada em turbogeradores com eficiências isoentrópicas entre 60 a 65% (consumo específico de 12 kg/kWh). Mesmo com a baixa eficiência das turbinas, dado o consumo de vapor elevado no processo (500 kg/tcana) das usinas existentes sem grande integração térmica, faz-se necessário o uso de válvulas de expansão (PELLEGRINI, 2009).



**Figura 16** - Sistema de geração de energia elétrica (USINA SANTA ELISA, 2011).

O padrão das usinas atuais é utilização de vapor a 65 bar/ 480°C para os turbogeradores de contrapressão / condensação, e de 100 bar/ 520°C, para os turbogeradores de condensação / extração ou contrapressão/ condensação (LEAL, 2010).

A palha da cana já começou a ser recolhida e utilizada na suplementação do bagaço, de forma que a geração de eletricidade excedente pelas usinas poderia ser estendida para o ano todo e o potencial par 150 kWh/ tcana, embora essa prática seja incipiente e necessita de desenvolvimento tecnológico para permitir seu uso em larga escala.

## **6 - LOGÍSTICA DE TRANSPORTE DE INSUMOS E PRODUTOS**

A decisão por investimentos para a expansão da produção de etanol e açúcar passa, necessariamente, por uma análise da área a ser utilizada, da proximidade dos centros de consumo ou a facilidade de acesso a esses centros (SCANDIFFIO, 2005), ou seja, à infraestrutura existente no que diz respeito a rodovias, ferrovias, hidrovias e dutos. A proximidade de subestações de energia elétrica é uma variável importante dado o potencial existente em uma usina ou destilaria de fornecer, além de açúcar e etanol, energia elétrica excedente do processo de fabricação (SETTEN, 2010).

A logística agroindustrial como um todo possui algumas características próprias que a diferencia da logística empregada em outras cadeias produtivas. Essas peculiaridades são perecibilidade dos produtos, sazonalidade da produção, ampla distribuição geográfica, baixo valor por unidade de volume ou peso, alto risco e mercados geralmente concorrenciais (ZANÃO, 2009). A logística agroindustrial é basicamente composta por transporte e armazenagem (NUNES, 2010)

A logística de transporte no setor sucroalcooleiro conta com prestadores de serviços logísticos que atuam nos modais rodoviário e ferroviário, podendo ser classificados como tradicionais e não tradicionais. Estes últimos são denominados operadores logísticos (COSTA, 2007). Um operador logístico pode ser definido como um especialista em fornecer serviços logísticos que visem o gerenciamento de todas as atividades logísticas ou parte delas nas várias fases da cadeia de abastecimento de seus clientes, agregando valor ao produto, e que tenha competência para, no mínimo, prestar simultaneamente serviços nas três atividades consideradas básicas, como controle de estoques, armazenagem e gestão de transportes (LUNA, 2007 *apud* JANOTTI *et al*, 2012).

### **6.1 - Transporte de cana-de-açúcar**

O transporte da cana-de-açúcar até a usina, no Brasil, é predominantemente feito com a utilização do modal rodoviário. A distância média de transporte dentro da usina, na região Centro-Sul, varia entre 30 e 40 quilômetros (SCANDIFFIO, 2005)

Após as etapas de colheita e carregamento, dá-se o processo de transporte da cana até a unidade processadora. O transporte de cana do campo para as fábricas é realizado essencialmente por meio do uso de caminhões, uma vez que é a forma de transporte que se apresenta mais adequada para as características de distâncias, volumes, agilidade, confiabilidade e periodicidade demandada no transporte dessa matéria-prima à fábrica, ao longo do seu ciclo de colheita em campo e processamento.

Para a cana colhida em áreas com colheita mecanizada, é adequada a utilização de reboques/ semi-reboques “fechados”. Nestes casos, diz-se que é feito o transporte de cana picada. Já em casos onde a matéria-prima é originária de áreas com colheita manual, são utilizados reboques / semi-reboques “abertos”. Diz-se nestes casos que é realizado o transporte da cana inteira (UNICAMP & CGEE, 2009).

Atualmente utilizam-se três tipos de transporte, o Romeu e Julieta, o Rodotrem e o Treminhão. O Romeu e Julieta tem um segundo reboque engatado no primeiro por meio de um sistema denominado rala - trata-se de um *dolly* (conexão de reboques) aparafusado, com um sistema de cremalheira. O Treminhão é composto por um conjunto Romeu e Julieta, no qual se acopla um reboque (ou Julieta). O Rodotrem constitui-se numa combinação de dois semirreboques (CGEE & BNDES, 2008). A Tabela 3 mostra as relações entre carga e consumo as diferentes opções para transporte de cana.

**Tabela 3** - Carga e consumo de diesel para os diferentes tipos de transporte de cana (CTC, 1990),

Tipo	Carga	Consumo (mL/t / km)
Caminhão simples	15	30
Romeu e Julieta	28	22
Treminhão	45	19
Rodotrem	58	16

A Figura 17 mostra o desenho esquemático dos três tipos de transporte e diferencia as combinações do caminhão com os reboques.

**Romeu e Julieta:**

Combinação de cinco eixos, incluindo um caminhão e um reboque.



**Treminhão:**

Combinação de sete eixos, incluindo um caminhão de dois reboques.



**Rodotrem:**

Combinação de nove eixos, incluindo um caminhão trator e dois reboques.



**Figura 17** - Rodotrem, Treminhão, Romeu e Julieta (BRAUNBECK & NETO, 2010).

O transporte da cana até a unidade processadora é um fator de extrema importância não só pelo fato de existir perda de qualidade da matéria-prima durante tal operação, mas também no que se refere ao montante dos custos de produção. Neste sentido, a logística e o raio médio do transporte impactam diretamente nos custos, podendo inclusive, inviabilizar o processo produtivo (MARQUES, 2009).

## **6.2 - Transporte de resíduos**

A logística de distribuição da palha, vinhaça e da torta de filtro varia bastante de um caso para outro, já que envolve topografias diversas que determinam um conjunto de operações e equipamentos diversos que conduzem a um manejo bastante complexo (BRAUNBECK & NETO, 2010).

A palha da cana-de-açúcar pode ser aproveitada na cobertura do solo ou na geração de energia. A fração da palha aproveitada agronomicamente é lançada ao solo durante a colheita; dessa maneira, não demanda esquemas logísticos para seu manuseio. O restante da palha precisa ser separada dos colmos, transportada e armazenada para finalmente, no período de entressafra, sofrer novo carregamento, transporte e descarregamento na esteira de alimentação das caldeiras ou dos processos de produção de combustíveis. (BRAUNBECK & NETO, 2010)

A logística de distribuição de vinhaça demanda capacidade de armazenamento temporário (piscina de vinhaça) que permita variações no regime da aplicação ou mesmo interrupções durante a mudança dos equipamentos nas frentes de aplicação ou nos períodos de precipitação elevada, assim como realizar reparos e manutenção de equipamentos (BRAUNBECK & NETO, 2010). O armazenamento da vinhaça é efetuado em locais estratégicos da lavoura que permitem atingir as áreas programadas para receber a fertirrigação. Adicionalmente, consideram-se a infraestrutura de aplicação, o planejamento da colheita de cana e, por sua vez, do plantio e, com isso, amplia as áreas passíveis de serem fertirrigadas (NUNES, 2010).

A distribuição da vinhaça no solo envolve quatro fases envolvendo o transporte primário, da indústria até os tanques de armazenamento, o armazenamento, o transporte secundário, dos tanques até as áreas de aplicação e a distribuição sobre o solo. O transporte da vinhaça da indústria até o campo pode ser realizado por sistemas de caminhão-tanque, dutovias ou sistemas conjugados (BRAUNBECK & NETO, 2010).

Os processos de aplicação e estocagem de torta de filtro exigem processos de controle, já que, pela sua elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO)<sup>18</sup>, pode-se transformar em fonte poluidora (RAMALHO & AMARAL-SOBRINHO, 2001). O aproveitamento da torta de filtro implica na utilização de várias operações de armazenamento, mistura, secagem, transporte, carregamento e descarregamento, dosagem e distribuição. Essas operações acontecem desde a saída do material da moenda da usina até sua colocação em contato com o solo (BRAUNBECK & NETO, 2010).

### **6.3 - Transporte de insumos**

Os principais insumos utilizados na fase industrial da produção de etanol e açúcar são basicamente os produtos químicos utilizados nos processos, a levedura e eventuais demandas que surgem eventualmente ao decorrer da produção. O serviço de transporte de insumos geralmente são realizados pelas empresas que comercializam estes produtos para as usinas, ou seja, a demanda pelo serviço de transporte de insumos se dá pela empresa que oferta o produto, e não pela usina (NUNES, 2010).

### **6.4 - escoamento do açúcar**

A logística do açúcar pode ser dividida no açúcar direcionado ao mercado interno e aquele voltado à exportação. Esta distinção se faz necessária uma vez que o comportamento dos fatores que afetam esta logística é distinto nos dois casos (NUNES, 2010).

O açúcar direcionado ao mercado externo representa 70% (NUNES, 2010) da produção do país, e apresenta uma logística mais bem estabelecida, tendo em vista que todo o produto deve necessariamente ser direcionado aos portos, e a demanda portuária pelo produto é, na maior parte das vezes, empurrada<sup>19</sup> (BUENO, 2012).

O modal rodoviário é amplamente utilizado na movimentação de açúcar na região Centro-Sul do Brasil, mesmo para longas distâncias onde se torna menos competitivo que outros modais (NUNES, 2010). De acordo com a concentração de mercado dos agentes responsáveis por oferecer o serviço de transporte deste modal e pelas características necessárias para viabilizar a movimentação no mesmo, como a necessidade de grandes volumes e de grandes distâncias, todo o fluxo de açúcar movimentado pelo modal ferroviário

---

<sup>18</sup> É definida como a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica biodegradável sob condições aeróbicas, ou seja, avalia a quantidade de oxigênio dissolvido (OD) em mg L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>, que será consumido pelos organismos aeróbios ao degradarem a matéria orgânica (LIMA *et al.*, 2006)

<sup>19</sup> Do inglês “*push system*”, o sistema de Produção Empurrada é determinado a partir do comportamento do mercado. Neste modelo, a produção em uma empresa começa antes da ocorrência da demanda pelo produto. Ou seja, a produção depende de uma ordem anteriormente enviada (BUENO, 2012).

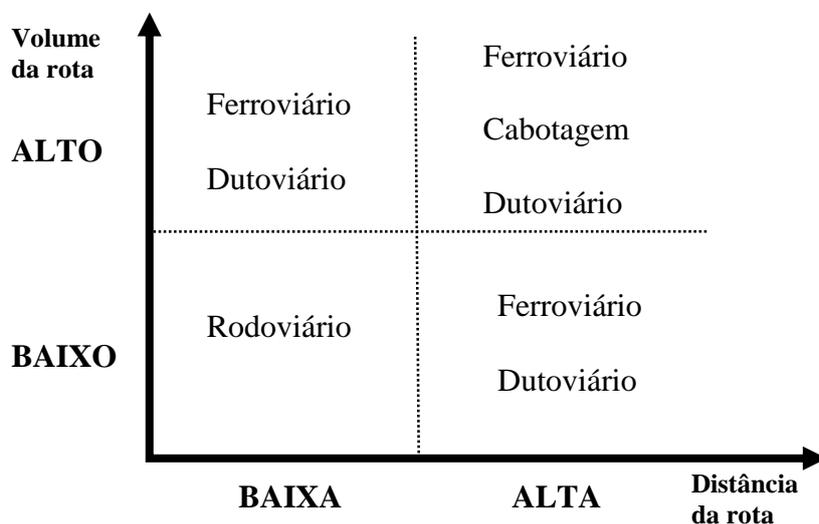
tem como destino a exportação, ocorrendo tanto pelo Porto de Santos quanto pelo Porto de Paranaguá (BIANCHINI & ASSUMPÇÃO, 2002).

O açúcar direcionado ao mercado interno representa aproximadamente 30% (NUNES, 2010) de todo o total produzido no país. Este açúcar tem como destino tanto os consumidores finais, que já vão consumir o açúcar da forma como ele sai da usina, como outras indústrias que o utilizam como matéria prima (BUENO, 2012).

### 6.5 - escoamento do etanol

Para NYKO *et al* (2010), atualmente a expansão da movimentação de etanol se baseia majoritariamente pelo crescimento da oferta de transporte rodoviário e pelo ferroviário em menor escala, assim, a manutenção dessa tendência tornará a infraestrutura logística incompatível com volumes de demanda doméstica e externa.

O aumento das escalas de volumes transportados pode contribuir significativamente para a diminuição de custos de transporte, já que torna mais atraentes investimentos em obras de infra-estrutura em modais de transporte com maiores custos fixos e menores custos variáveis (XAVIER, 2008). A Figura 18 apresenta o modelo da matriz de transporte conceitual, proposta por Figueiredo (2006), relacionando volume e distância da rota com as melhores opções de modais de transporte de combustíveis.

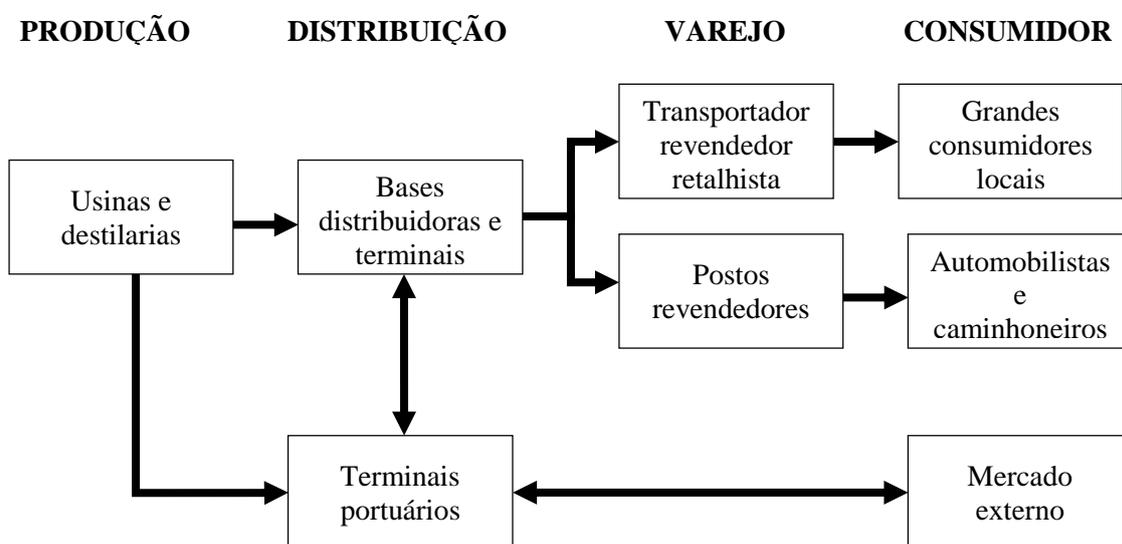


**Figura 18** - Modelo da matriz de transporte conceitual (adaptado de FIGUEIREDO, 2006).

No modal rodoviário, os caminhões-tanque das distribuidoras transportam o etanol combustível da usina até as suas bases ou terminais. A partir deste ponto, entregam o produto aos postos de abastecimento ou ao revendedor retalhista. Este último fornece o combustível

para as pequenas empresas e produtores rurais. A partir da usina ou destilaria, o etanol pode também seguir diretamente para os terminais portuários, para ser enviado ao mercado externo (SCANDIFFO, 2008).

Basicamente, a logística de abastecimento de etanol no Brasil pode ser dividida em quatro etapas. No mercado interno, primeiramente o etanol sai das unidades produtoras, passa pelas distribuidoras e terminais, segue para os postos revendedores onde é então vendido aos consumidores finais. Para o caso do mercado externo, pode haver a importação do combustível ou a exportação pelas usinas e distribuidoras (XAVIER, 2008). A Figura 19 representa essas etapas e seus respectivos fluxos.



**Figura 19** – Fluxos e etapas da cadeia logística do etanol (adaptado de XAVIER, 2008).

Os diversos fluxos de distribuição do etanol apresentados na Figura 19 são comumente classificados, no mercado de transporte, como fluxos primários, fluxos de transferência e fluxos de entrega (FIGUEIREDO, 2006). Essa classificação depende da etapa de transporte e das origens e destinos. Isso porque os modais de transportes utilizados, as empresas prestadoras de serviços, os agentes envolvidos e até os equipamentos de transporte são distintos em cada uma das etapas (MITSUTANI, 2010).

## **7– DESCRIÇÃO METODOLÓGICA DAS ETAPAS DA ACV**

Esse capítulo basicamente descreve as pragmáticas padronizadas pela ISO 14040 acerca da condução da ACV em estudo. Conforme explicitado na Figura 2, a ACV em questão foi conduzida considerando as etapas de definição de metas, definição de escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e posterior da interpretação dos resultados obtidos. Além disso será realizada uma breve descrição do modelo tecnológico da usina caracterização, apontando as informações relevantes e mostrando os fluxogramas dos processos produtivos, inseridos no *software* GaBi 6 Education®, que sintetizam todo o balanço mássico e energético obtido do questionário de inventário de ciclo de vida.

### **7.1 – Definição de objetivo**

Seguindo as diretrizes da metodologia da ACV objetivou-se quantificar os fluxos mássicos e energéticos que compõem a fase industrial de produção de etanol e açúcar para obtenção de balanços que representam o desempenho ambiental do sistema avaliado.

### **7.2 – Definição de escopo**

Trata-se da etapa que delimitará a destinação do estudo, ou seja, a magnitude do limite do sistema analisado e as definições básicas que são referência válidas para todo os subsistemas existentes no estudo. Como parte de definição do escopo, a função e a unidade funcional do produto serão definidas, bem como as fronteiras do sistema analisado.

#### **7.2.1 - Função do sistema**

A função do sistema tem o propósito de mostrar a característica de desempenho ambiental do produto, ou seja, é a finalidade para a qual o produto final é destinado (ISO 14044, 2006). Neste estudo, a função do sistema é a obtenção de etanol anidro e hidratado para uso como combustível veicular, além de açúcar para exportação.

#### **7.2.2 - Unidade funcional**

Para satisfazer a função do sistema, a unidade funcional é 1000 kg de cana-de-açúcar colhida e moída para produção de etanol anidro misturado à gasolina (25% v/v na gasolina) destinado à utilização em veículos de passeio de porte médio com consumo de 12 km/ L percorrendo 180 km em rodovia asfaltada.

### 7.2.3 - Fluxo de referência

O fluxo de referência foi delimitado de forma que todos os dados secundários coletados se relacionassem a medida de componentes e operações necessárias para atender à função do sistema. Deste modo, o fluxo de referência foi expresso por 11,87 kg de etanol anidro com 0,3 % de água e densidade de 0,789 g/cm<sup>3</sup>.

### 7.2.4 - Fronteira do sistema

As fronteiras do sistema referem-se à determinação de quais processos unitários devem ser incluídos no sistema a ser avaliado (UNEP/SETAC, 2009). As fronteiras do sistema foram definidas e prosseguidas por um inventário detalhado de entradas e saídas que foram registrados em uma base de dados. A Figura 20 representa a fronteira do sistema em estudo, ela é basicamente composta por três grandes sistemas: fornecimento de insumos e matérias-primas, fase industrial de produção de açúcar e etanol e distribuição de açúcar e etanol. Essa grande fronteira pode ser entendida como um processo que compila sub-processos, formando um sistema com suas respectivas entradas e saídas.



**Figura 20** - Representação esquemática da fronteira do sistema do estudo.

A fase industrial de produção de etanol e açúcar é a mais relevante em termos ambientais ao longo da fronteira do sistema caracterizado no estudo, consistindo em uma análise “do portão ao portão (*gate to gate*)”, sendo constituído dos seguintes processos:

- *Processos principais*: recepção, preparo e extração do caldo; tratamento do caldo; geração de vapor e de eletricidade; fermentação; obtenção de etanol (destilação de desidratação); fábrica de açúcar e armazenamento de etanol, açúcar e vinhaça.
- *Processos auxiliares*: transporte; tratamento de água; captação de água; uso de diesel desmineralização de água e venda de energia.

### 7.3 – Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

O inventário é a fase da ACV onde os dados são coletados, os sistemas são modelados, e os resultados de ICV são obtidos. Com a definição do objetivo e escopo do estudo, um plano inicial para a realização da fase de inventário da ACV pode ser elaborado. A ICV consiste em um conjunto de ações com a coleta de dados primários, caracterização do modelo tecnológico, relação dos dados à unidade funcional e agregação (quando aplicável) e avanço no refinamento iterativo das informações incluídas na fronteira do sistema em estudo com base na coleta de dados.

O ICV se baseia principalmente na análise de sistema tratando a cadeia de processos como uma seqüência de sub-sistemas que interagem entre as entradas e saídas. Por isso, no ICV o sistema de produto é definido, que inclui a definição das fronteiras do sistema, delimitando diagramas de fluxos com processos unitários, coletando dados para cada um desses processos, utilizando etapas de alocação para processos multifuncionais e completando os cálculos finais (ILCD Handbook, 2010). O principal resultado é uma tabela de inventário, em que os fluxos materiais e de energia associados com a unidade funcional são compilados e quantificados (ISO 14040, 2006).

No presente estudo, o ICV foi elaborado a partir de visitas à empresa e troca de informações com especialistas para preenchimento de questionário panorâmicos em forma de balanços mássicos e energéticos. A diversidade de informações coletadas na visita técnica à usina condicionou o mapeamento tecnológico da planta industrial no GaBi 6 e preenche difusamente os itens relevantes incluídos no questionário de inventário de ciclo de vida elaborado para coleção de dados relativos à produção de etanol e açúcar.

Posteriormente à etapa de Inventário de Ciclo de Vida, todo o balanço mássico e energético elaborado, tanto para uma planta operando com moagem de 573 ton./h quanto para 650 ton./h, foi incluído no software GaBi 6 para que fosse diagnosticado o desempenho ambiental do modelo tecnológico caracterizado. Para isso, delimitaram-se cenários

produtivos que representam projetos de plantas industriais de interesse da usina de forma à comparar viabilidade de implantação destes no âmbito ambiental e econômico. A escolha das categorias de impactos e variáveis produtivas a serem avaliadas também foi realizada de acordo com interesses e prioridades apontadas pela empresa.

#### **7.4 – Caracterização da Usina Jalles Machado S/A**

Esse item discorre sobre as informações obtidas a partir na etapa de coleta de dados de inventário de ciclo de vida referentes aos fluxos mássicos e energéticos e processos que compõem a cadeia produtiva do etanol e açúcar obtidos na Usina Jalles Machado S/A, instalada na cidade de Goianésia em Goiás. Serão apresentadas as informações obtidas através de entrevistas com especialistas e planilhas e relatórios fornecidos pela usina. Os dados foram coletados de acordo com as prerrogativas incluídas no questionário ICV.

A Figura 21 refere-se ao fluxograma geral que caracteriza o modelo tecnológico da fase industrial. Nota-se que os fluxos são quantificados de acordo de forma que se relacione à uma produção de 573 t/h, ou seja, o fluxo de referência adotado (1 ton. de cana) foi convertido para uma escala que representa a produção por hora com o intuito de comparar os impactos com a moagem de cana à taxa de 650 t/h (projeto da usina) e apresentar os resultados de acordo com o a unidade de medição mais usual da usina.

# Modelo Tecnológico\_Fase Industrial\_Padrão\_moagem 573 t/h\_Jalles Machado

Plano de processo GaBi:Quantidades de referência

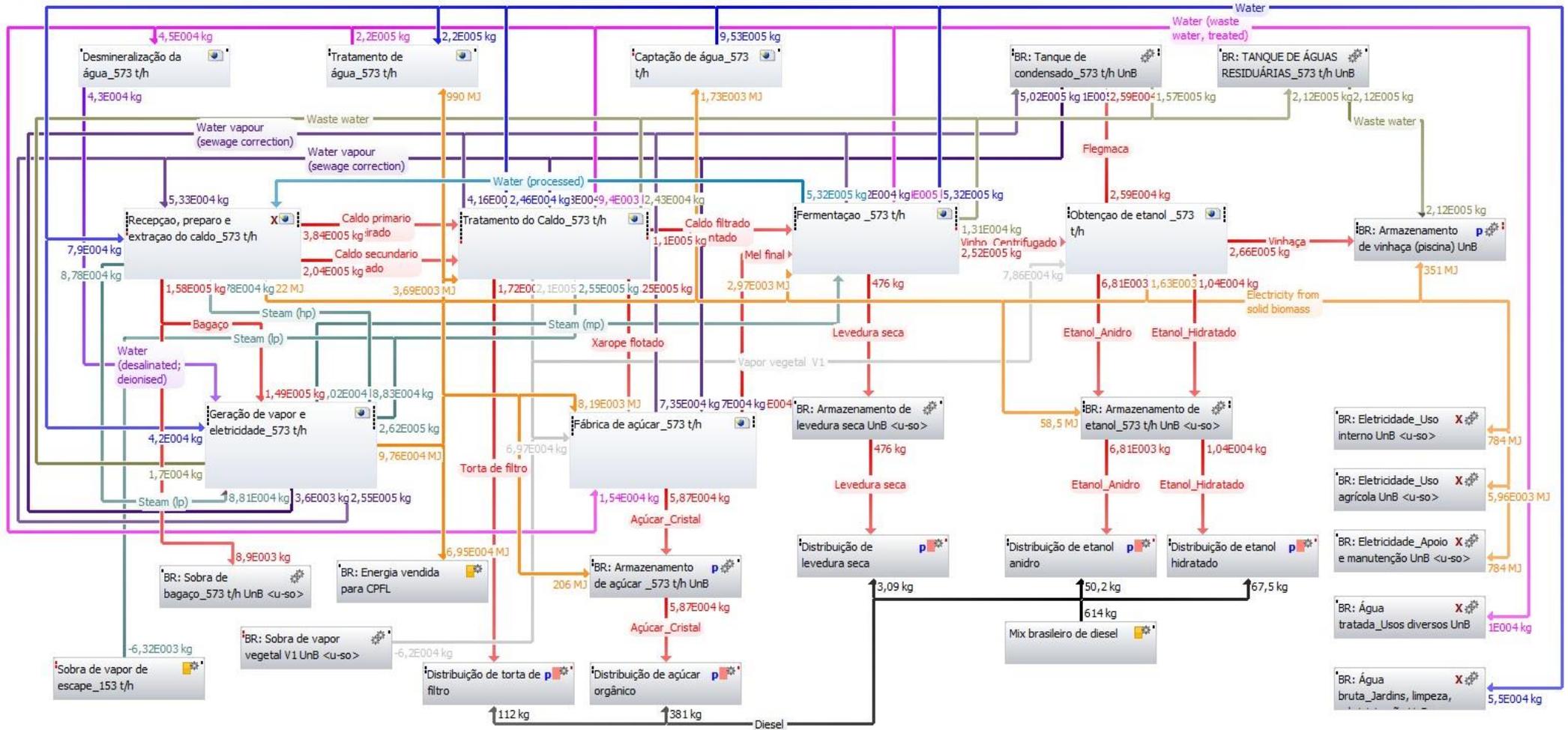


Figura 21 – Fluxograma GaBi da fase industrial do processo produtivo da Usina Jalles Machado.

#### **7.4.1 - Descrição do modelo tecnológico por etapa produtiva**

O fluxograma geral (Figura 21) representa a agregação do diagrama térmico, hídrico e mássico em um único sistema de forma a compilar todos escoamentos referentes às entradas e saídas dos subsistemas que compõem o diagrama geral, estes são entendidos como processos compostos por um conjunto de subprocessos, o que é chamado de “caixa preta”. A seguir serão descritas as peculiaridades mais relevantes das etapas produtivas e suas respectivas representações em formas de fluxograma do GaBi 6. A seguir serão descritas as principais peculiaridades da produção:

*Recepção, preparo e extração do caldo:* A cana é transportada do campo por rodotrem em praticamente toda sua totalidade. Antes de passar pelas moendas é feita a lavagem da cana, esta etapa é feita com água que está em um sistema fechado. A água fica dentro do sistema fechado ao longo de todo o período de safra, e é repostada quando há perdas. Ao término da safra, a água é reutilizada para irrigação e fertilização do solo no cultivo da cana. Os sistema de preparo e extração do caldo funciona a partir da energia elétrica provida de turbogeradores acionados pelo vapor gerado por duas caldeiras, mais especificamente, são dois turbogeradores para as moendas, um para os picadores e um para os desfibradores. As saídas desse sistema são caldo primário e caldo secundário para o tratamento.

*Cogeração de Energia:* A cogeração de energia é realizada através da utilização de todo bagaço proveniente da moagem de cana (cerca de 26% da cana moída) para alimentar a caldeira e acionar o sistema turbo-gerador. A fuligem (cinzas) gerada pela caldeira é filtrada para posteriormente ser enviado para a compostagem e ser utilizada como fertilizante na lavoura de cana. As emissões diárias provenientes da caldeira foram caracterizadas.

A unidade de cogeração atual utilizada uma caldeira capaz de produzir 160.000 kg/h de vapor e uma outra, a 200.000 kg/h de vapor, ambas com pressão de trabalho de 43 bar a com uma temperatura de vapor superaquecido de 400°C. A biomassa não passa pelo processo de secagem após passar pela caldeira, apresentado umidade entre 50 e 52%. Posteriormente, há o acionamento de um turbo-gerador de contrapressão e um de condensação, com capacidades de geração de 30 MW e 12 MW, respectivamente. A planta gera cerca de 29,6 MWh e consome cerca de 10,9 MWh de energia elétrica, sendo o excedente de 18,7 MWh vendidos para a rede.

*Tratamento do Caldo:* Os fluxos mássicos e energéticos existentes na etapa de tratamento do caldo apresentam valores variáveis de acordo com a produção de cana e com brix obtido em determinada fase do ano produtivo. A sequência de processos envolvidos segue o padrão implantado nas usinas de etanol, sendo como peculiaridades principais a esterilização seguida de resfriamento do caldo misturado de polímeros e nutrientes para sua clarificação. Cal virgem e enxofre são os principais insumos na etapa de sulfitação e caleagem. Essa é representação de um sistema voltado para a produção de açúcar cristal. Na produção de açúcar orgânico, essas três últimas etapas não são utilizadas. Também são apresentadas as etapas de evaporação de múltiplos efeitos para obtenção de xarope flotado e a recuperação do lodo filtrado. As saídas desse sistema são lodo filtrado (vai para compostagem), o xarope flotado (vai para a fábrica de açúcar) e caldo filtrado (vai para fermentação).

*Fábrica de açúcar:* A fábrica de açúcar é a etapa mais modernizada e consolidada devido ao fato de o produto ser o mais rentável financeiramente, já que a usina é umas das principais exportadoras de açúcar dos tipos cristal, VHP e orgânico do Brasil. Nesse estudo, considerou-se a produção voltada para produção de açúcar cristal como padrão, embora também tenha sido considerada a produção de orgânico como um cenário produtivo (será apresentado a seguir). A fábrica é composta por um conjunto de dois cozedores, dois cristalizadores e duas centrífugas, além de secadores e tanques intermediários. O resíduo denominado mel final é acrescido ao processo de fermentativo.

*Fermentação:* O processo de fermentação leva de 10 a 13 horas, após serem acrescidos leveduras e mel final ao mosto. Ocasionalmente há arraste de etanol pelo CO<sub>2</sub>, deste modo há colunas lavadoras que recuperam o etanol arrastado. Para controle do pH na fermentação o ácido sulfúrico é utilizado (98% de pureza e densidade de 1,83 g/cm<sup>3</sup>). O vinho bruto é o produto das fermentações após passagens pelas dornas, obtendo teor de etanol entre 8 a 12% GL. Depois o vinho bruto é filtrado e é então chamado de vinho centrifugado que também apresenta de 8 a 12% de etanol (pode haver o incremento em 0,5 pontos após a centrifugação). Após a passagem nas dornas o vinho bruto é centrifugado, gerando dois produtos: vinho centrifugado e o leite de levedura. O leite de levedura retorna ao processo. A levedura residual comercializada após sua secagem.

*Obtenção de Etanol:* No processo de destilação, são gerados quatro produtos: etanol, vinhaça, flegmaça e óleo fúsel. A flegmaça e o óleo fúsel são compostos de alcoóis

superiores e outros compostos subprodutos durante a fermentação. A usina produz e vende etanol hidratado e anidro. Após a destilação e retificação, a vinhaça é apenas resfriada e bombeada diretamente no campo. São produzidos entre 13 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol, todo o volume produzido é utilizado como fertilizante no campo devido à sua capacidade de substituir parte de alguns insumos agrícolas como potássio e nitrogênio, juntamente com outras matérias orgânicas provenientes de resíduos resultantes de operações industriais. Como ela sai do destilado a uma temperatura de aproximadamente 83°C é realizado o resfriamento a uma temperatura cerca de 70% inferior da saída do destilador através de trocadores de calor sendo, assim, lançada em um grande reservatório comumente chamado de “piscina de vinhaça” e posteriormente bombeada para lavoura de cana já misturada com as matérias orgânicas.

*Uso de Água:* Assim como a vinhaça, águas residuais ricas em compostos orgânicos são totalmente aproveitadas para fertilização do campo, estas passam por tratamento com a utilização de ácido clorídrico 33% e hipoclorito de sódio. Já a água utilizada na planta é tratada com a utilização de soda cáustica 50% (1,53 g/cm<sup>3</sup>) e para o tratamento da água que vai para a caldeira, utiliza-se resina de troca iônica. Água desmineralizada e condensados também são utilizados nos processos, praticamente suas totalidades na cogeração. A captação de água para uso na usina é feita de por três fontes fluviais (represas) próximas à planta, de onde é bombeada com a operação de um conjunto de bombas.

As figuras seguir mostram os fluxogramas detalhados dos processos descritos.

## Recepção, preparo e extração do caldo\_573 t/h

Plano de processo GaBi:Quantidades de referência

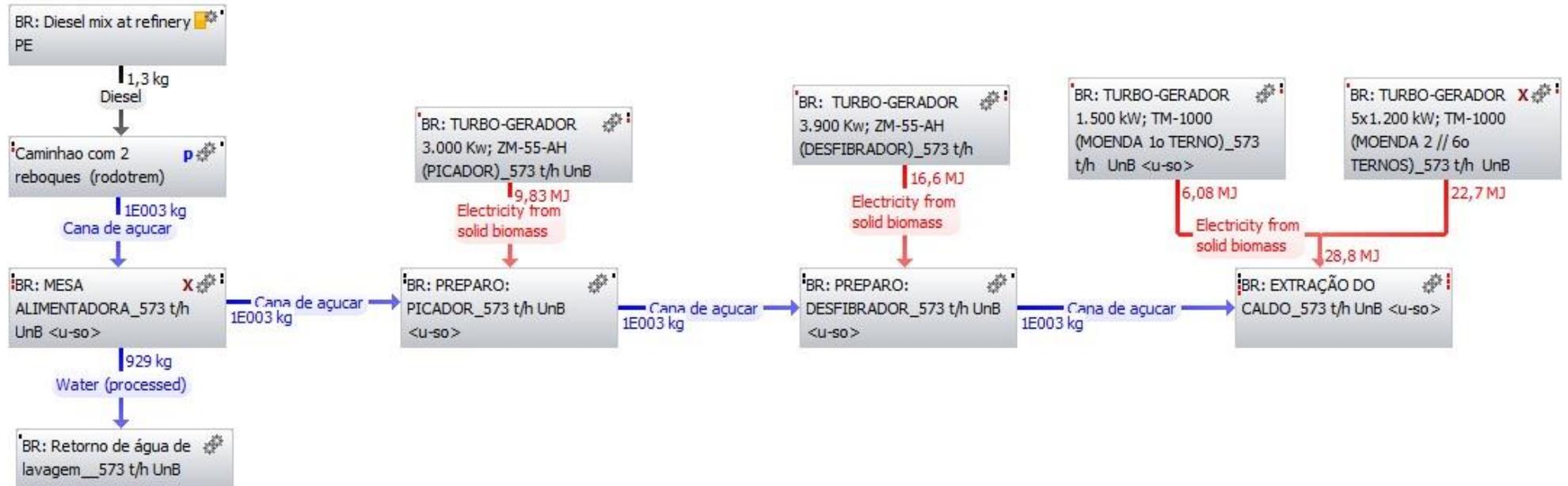
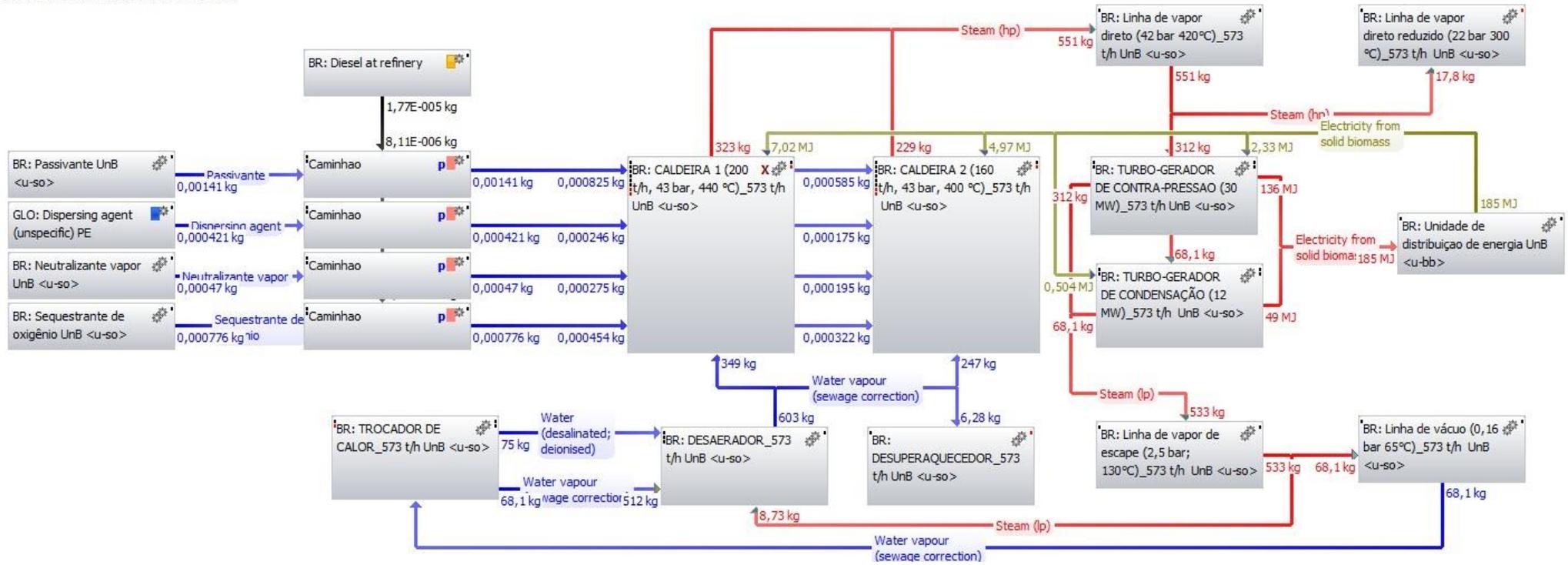


Figura 22 - Fluxograma GaBi da etapa de recepção, preparo e extração do caldo.

## Geração de vapor e eletricidade\_573 t/h

Plano de processo GaBi/Quantidades de referência



**Figura 23** - Fluxograma GaBi da etapa de desmineralização da água geração de vapor e eletricidade.

# Tratamento do Caldo\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]

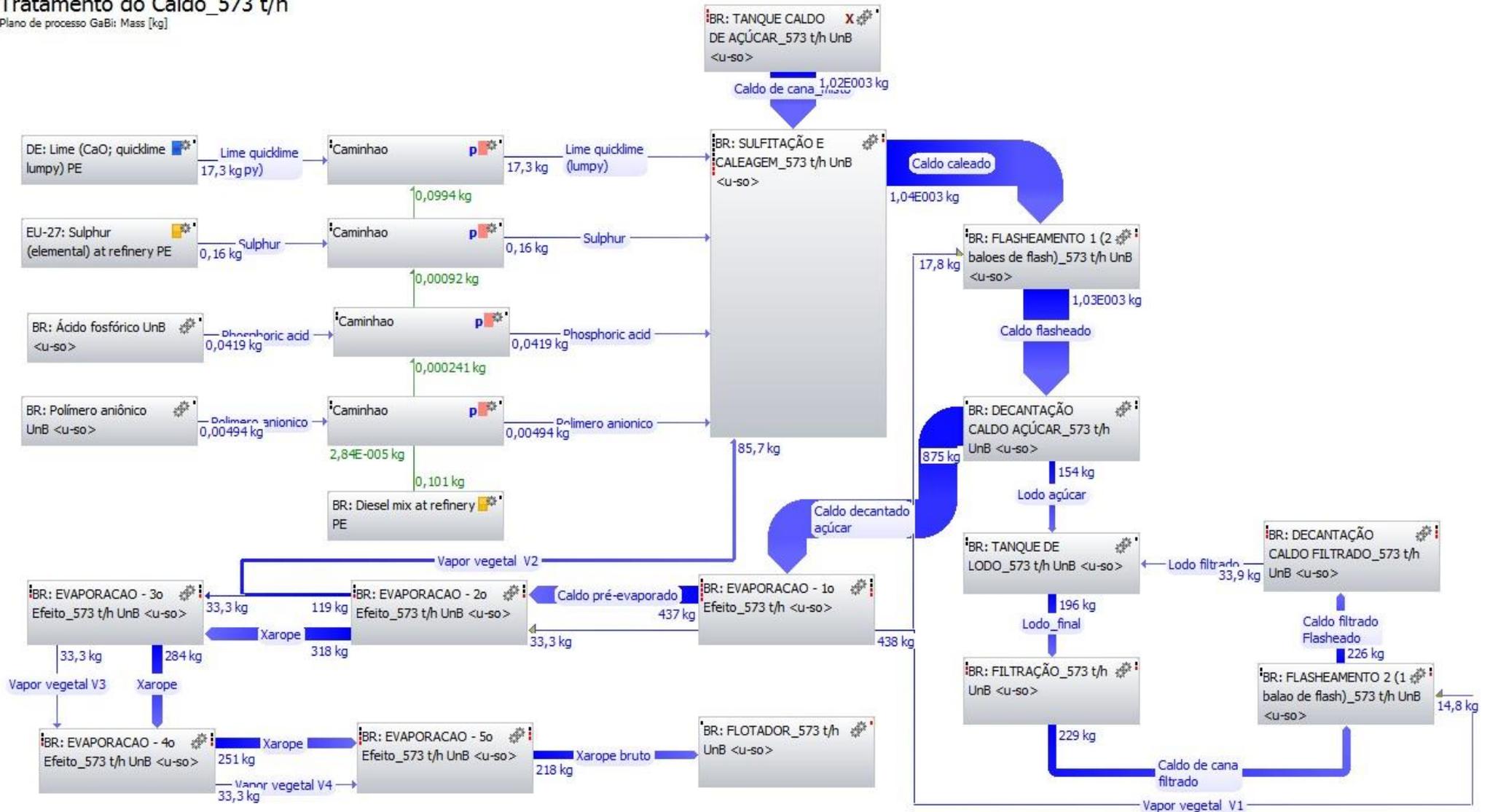


Figura 24 - Fluxograma GaBi da etapa de tratamento do caldo.

# Fábrica de açúcar\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]

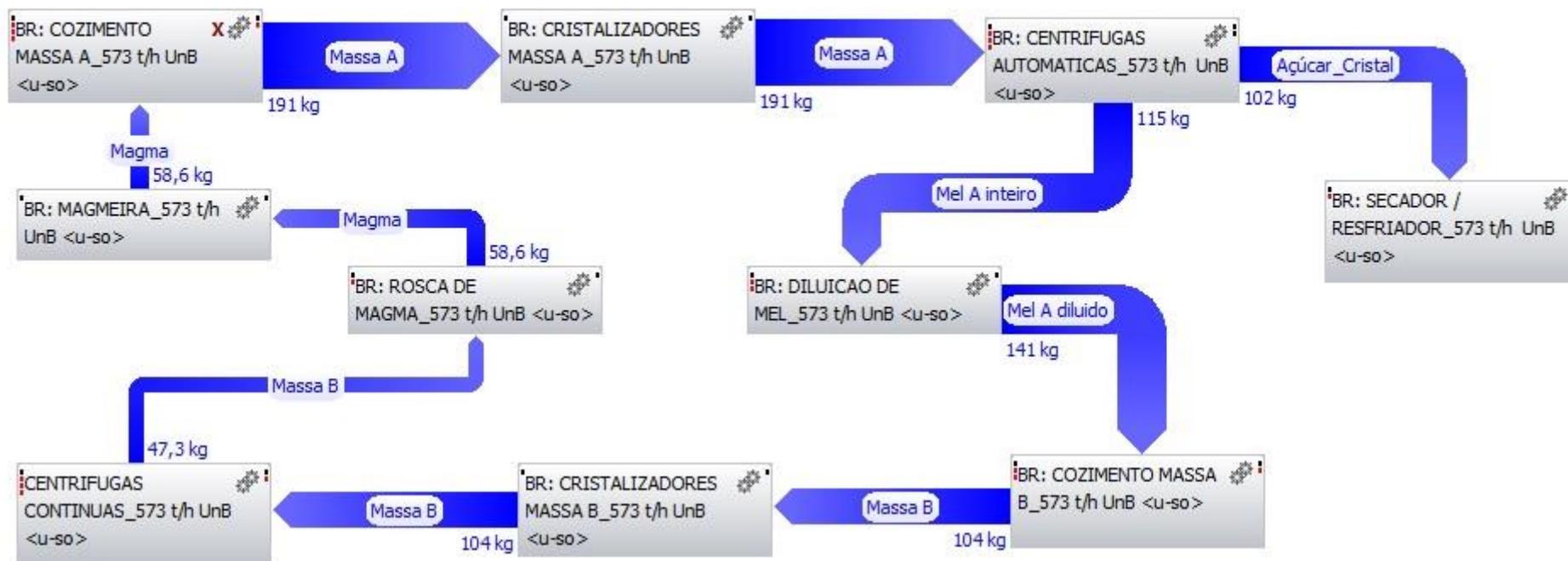


Figura 25 - Fluxograma GaBi da etapa de fabricação de açúcar.

# Fermentação\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]

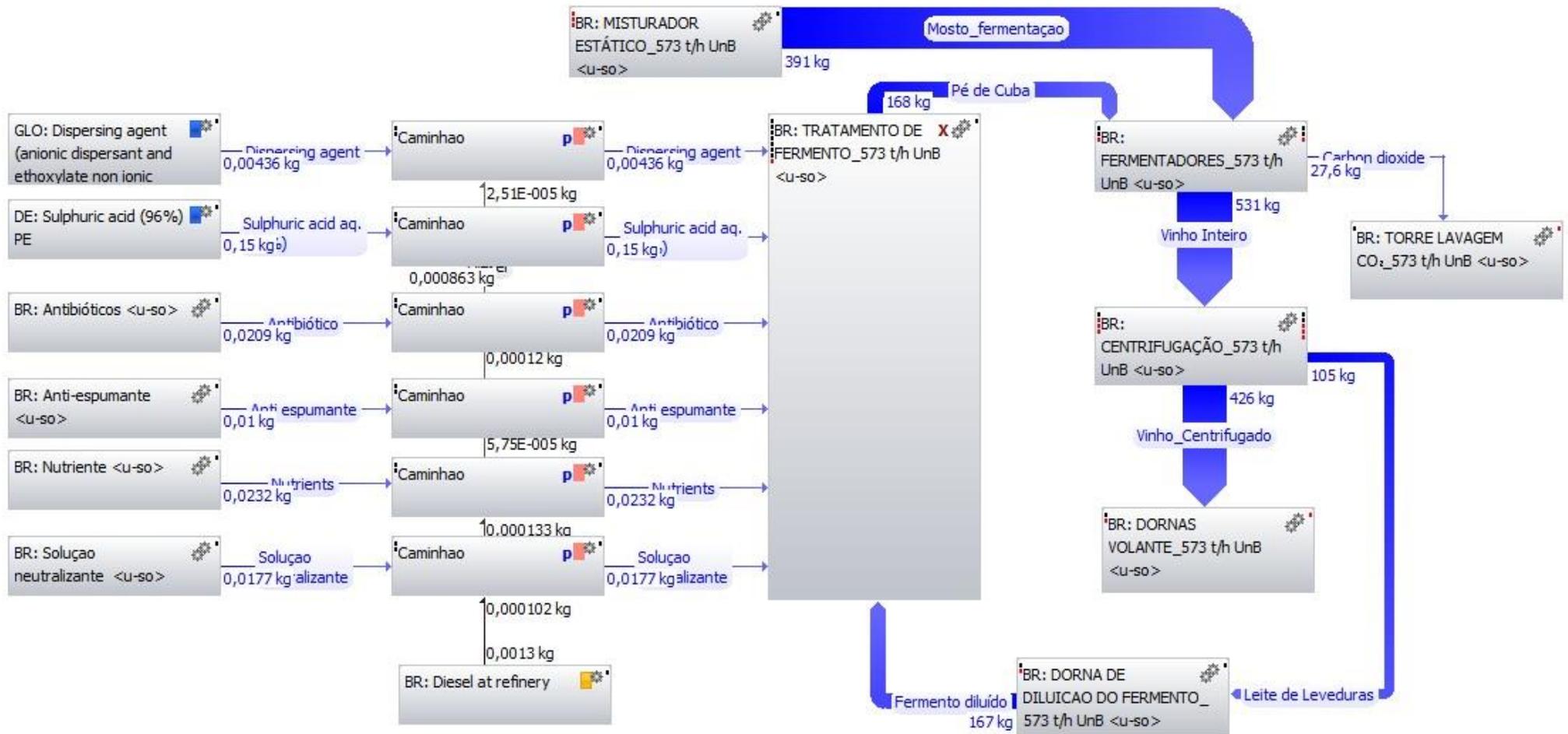
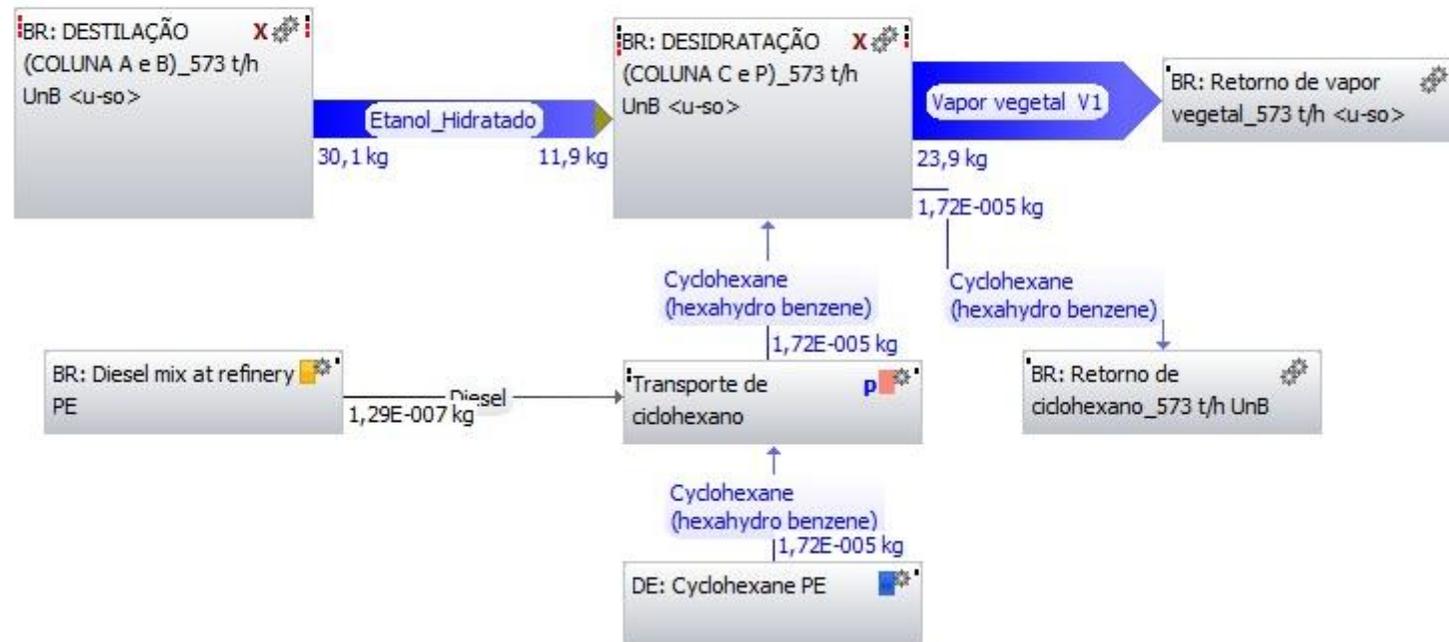


Figura 26 - Fluxograma GaBi da etapa de fermentação.

# Obtenção de etanol \_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]



**Figura 27** - Fluxograma GaBi da etapa de obtenção de etanol.

### Captação de água\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]

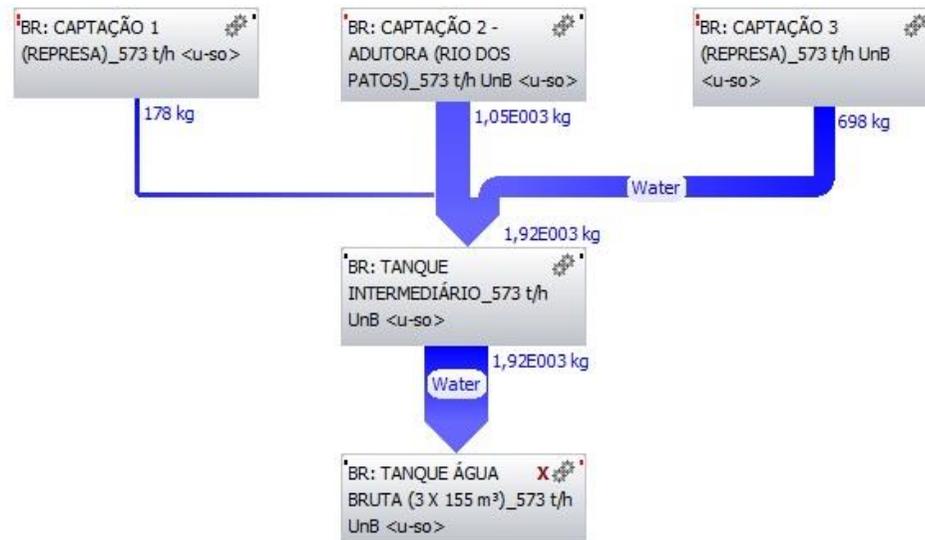


Figura 28 - Fluxograma GaBi da etapa de captação da água.

### Desmineralização da água\_573 t/h

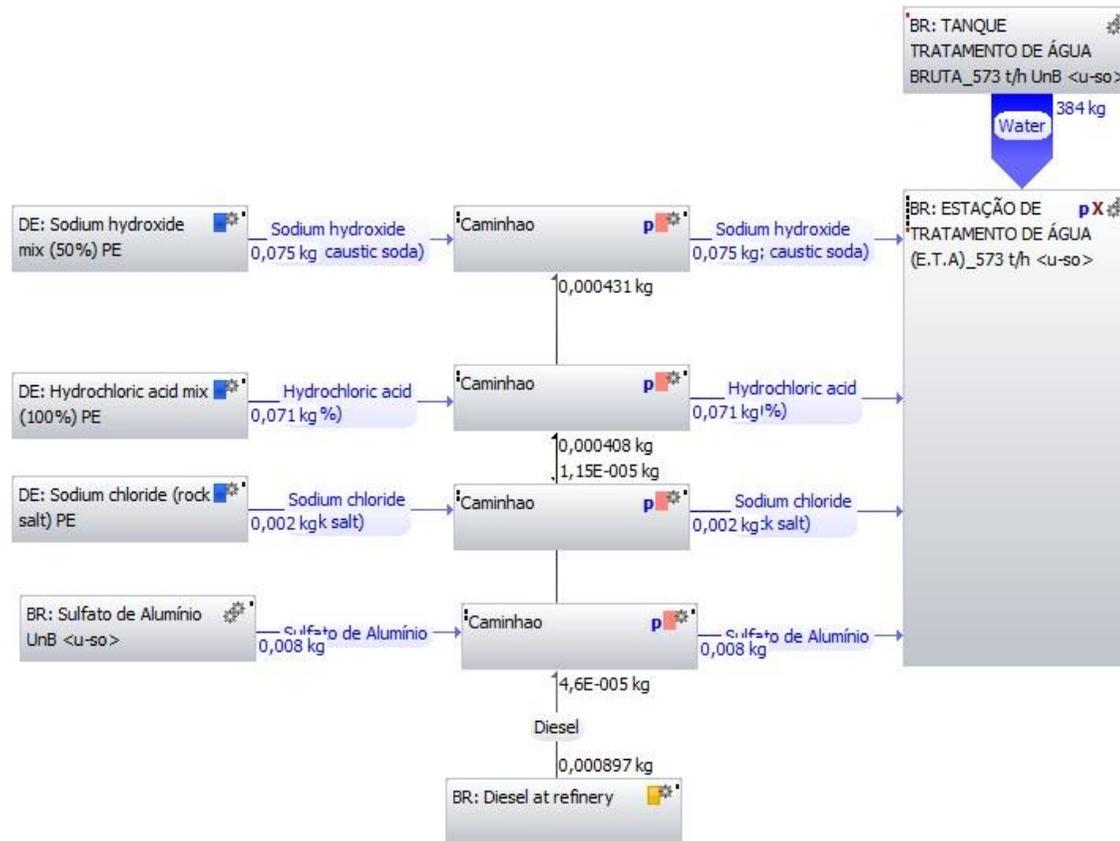
Plano de processo GaBi: Mass [kg]



Figura 29 - Fluxograma GaBi da etapa de desmineralização da água.

# Tratamento de água\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]



**Figura 30** – Fluxograma GaBi da etapa de tratamento de água.

## **8 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Para o presente estudo, avaliando os resultados obtidos para diferentes categorias de impactos notou-se as categorias de Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Potencial de Depleção de Recursos Abióticos para fósseis (ADP fóssil) foram as que apresentaram os valores mais significativos. Com base na Figura 3, nota-se que primeira refere-se à Mudanças Climáticas, um indicador de *midpoint* e segunda se encaixa ao indicador de *endpoint* referente à recursos. Logo, a AICV será realizada avaliando especificamente a duas categorias, sendo a caracterização das emissões de GWP de maior relevância por parte da Usina Jalles Machado, já que está diretamente relacionadas à créditos de carbono e certificações ambientais para manutenção de comércio de internacional de seus produtos.

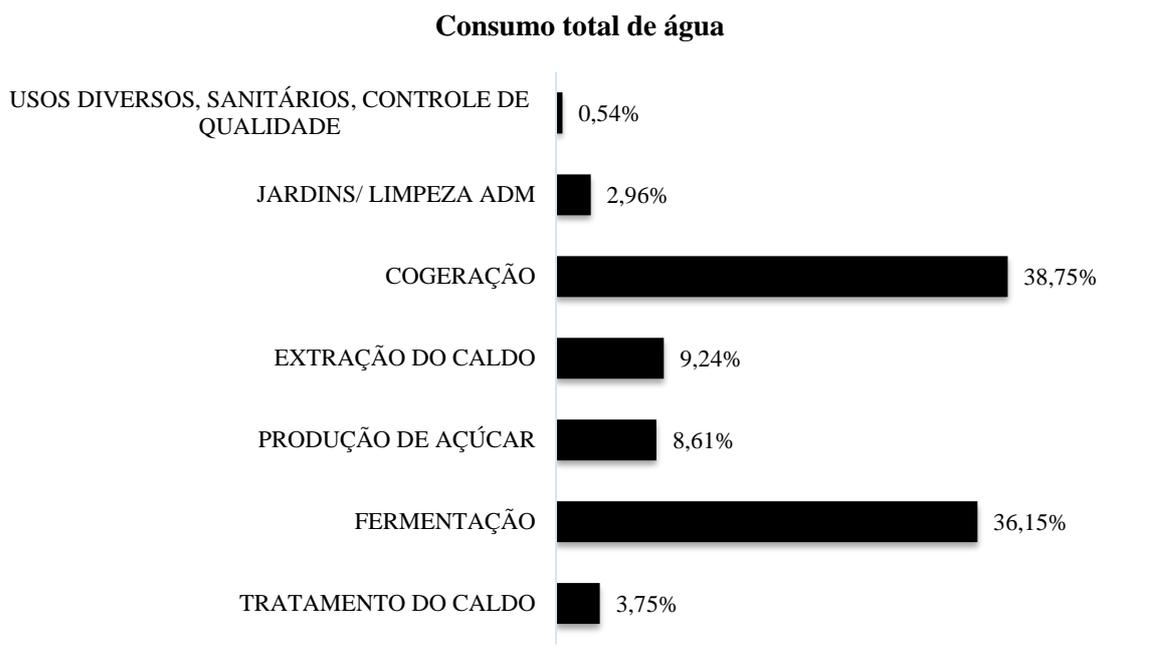
### **8.1 – Balanço mássico e energético da Usina Jalles Machado S/A**

Os itens a seguir apresentarão o panorama atual da Usina Jalles Machado S/A com respeito à balanço mássico e energético, focando nos resultados obtidos do diagrama térmico, hídrico, energético e mássico. Os resultados contribuirão consideravelmente na visualização simplificada da contribuição ambiental de cada etapa produtiva.

#### **8.1.1 – Consumo de água**

O uso da água é um indicador ambiental essencial para todas as atividades do ciclo de vida do produto (KOEHLER, 2008). Os impactos ambientais associados ao uso da água tanto para uso direto quanto para indireto, são de grande importância para obtenção da pegada hídrica ao longo da fase industrial do ciclo de vida dos produtos caracterizados na Usina Jalles Machado. A partir das informações dos diagramas hídricos da usina, tratando-se de dados referentes uma planta que funciona com moagem de cana à taxa de 573 ton./h (padrão atual implantado) e também para moagem 650 ton./h (projeto futuro da usina), os fluxos mássicos de águas utilizadas no processo industrial foram incorporados ao inventário.

A Figura 31 mostra as proporções de consumo total de água para as peculiares aplicações na usina, estes valores contabilizam o somatório de águas (água bruta, água condensada, água tratada e água desmineralizada) utilizadas no padrão atual. As mesmas informações foram inseridas para o balanço hídrico referente à moagem de 650 ton./h, embora não tenham sido apresentadas a seguir.



**Figura 31** - Consumo médio de água por etapa produtiva.

Os resultados apontam que as etapas de fermentação e cogeração são as que mais consomem água, 36,15 % e 38,75 %, respectivamente. Esses valores estão diretamente relacionados à elevada demanda de água bruta (proveniente da captação) e de água condensada (provenientes de vapores condensados) nas caldeiras à ao alto consumo de água bruta e tratada nos processos que envolvem a maioria das etapas de fermentação, já que são realizadas misturas e diluições ao longo processo de obtenção de vinho. O balanço mássico de água para todos os processos que envolvem seu uso está inserido de forma detalhada no questionário de inventário de ciclo de vida.

Como as variedades de águas utilizadas possuem características diferentes e as respectivas proporções de uso variam por etapa produtiva, avaliou-se o consumo de água da planta de forma que fosse possível identificar o destino de cada uma delas no sistema industrial. A Tabela 4 mostra os consumos e proporções de uso e água bruta, condensada, tratada e desmineralizada. Na tabela não está incluída a proporção de águas residuais (inseridas no tanque de armazenamento de vinhaça) por se referir a consumo, embora seu balanço esteja inserido no questionário e no software.

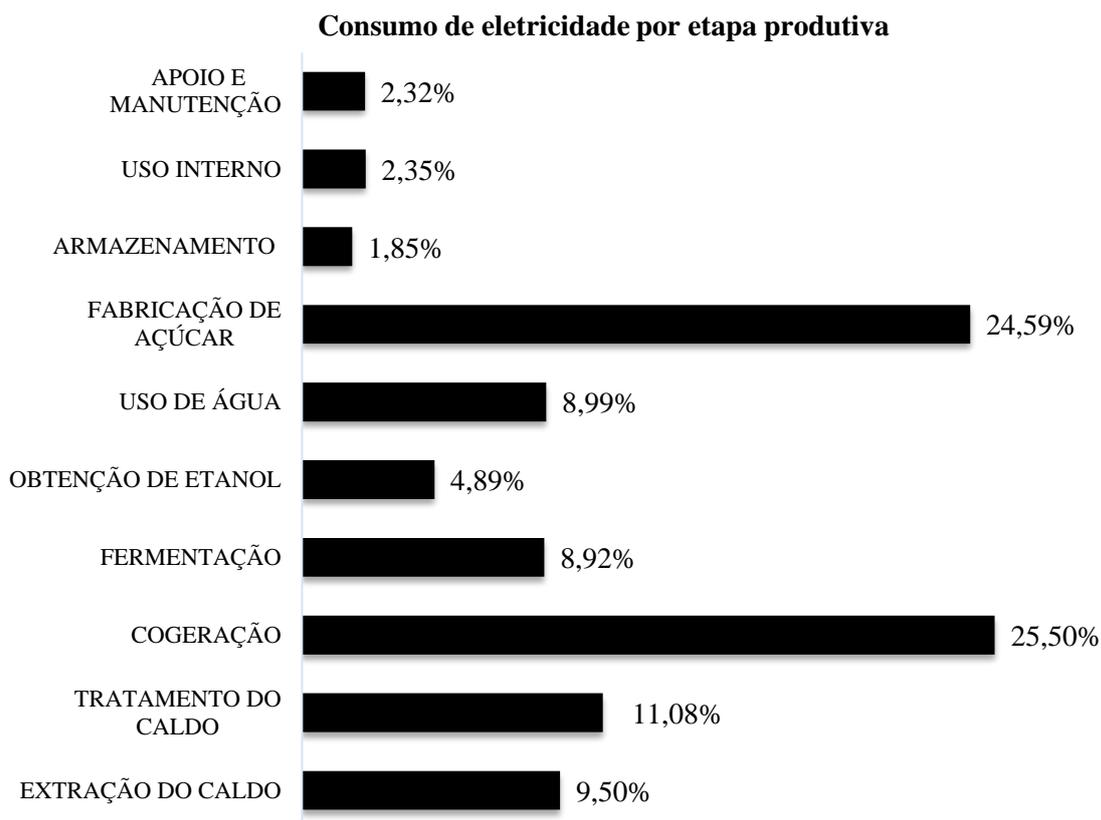
**Tabela 4** Consumo de águas inseridas na produção industrial.

<b>CONSUMO DE ÁGUA</b>			
<b>TIPO</b>	<b>ETAPA PRODUTIVA</b>	<b>Kg / t cana</b>	<b>Proporção</b>
Água condensada	Tratamento do caldo	62,48	4,53%
	Produção de açúcar	46,60	3,38%
	Extração do caldo	162,30	11,76%
	Cogeração	1109,25	80,34%
Água tratada	Tratamento do caldo	16,40	5,37%
	Produção de açúcar	26,88	8,80%
	Fermentação	244,68	80,11%
	Usos diversos	17,45	5,71%
Água bruta	Tratamento do caldo	42,93	2,89%
	Produção de açúcar	205,93	13,87%
	Extração do caldo	137,70	9,28%
	Cogeração	73,30	4,94%
	Fermentação	928,45	62,55%
Jardins, limpeza, administração	95,99	6,47%	
Água desmineralizada	Cogeração	75,04	100,00%

Analisando os maiores consumidores de água, tem-se que a cogeração é a etapa que mais contribui com o consumo de água condensada (80,34 %) e desmineralizada (100 %), e a fermentação a que mais consome água bruta (62,55 %) e água tratada (80,11 %). Esse diagnóstico é essencial para que sejam analisados projetos e medidas que almejem a racionalização do uso de água focada nessas etapas, pois é significativa a magnitude dos valores quando comparados às outras.

### **8.1.2 - Balanços energéticos**

Baseado no diagrama térmico, considerando fluxos de eletricidade e vapor, e informações de rateio fornecidas pela usina, realizou-se o balanço energético do modelo da planta atualmente em funcionamento. Basicamente, o sistema de cogeração fornece energia à usina (autossuficiente) em forma de vapor (316 t/h gerados) e eletricidade (29,6 MWh gerados e 10,9 MWh consumidos), sendo o excedente de energia elétrica vendida (18,7 MWh) para a CPFL. O Figura 32 mostra o consumo relativo de eletricidade por etapa produtiva e a Tabela 5 mostra o consumo relativo e absoluto de vapores.



**Figura 32** - Consumo de eletricidade por etapa produtiva.

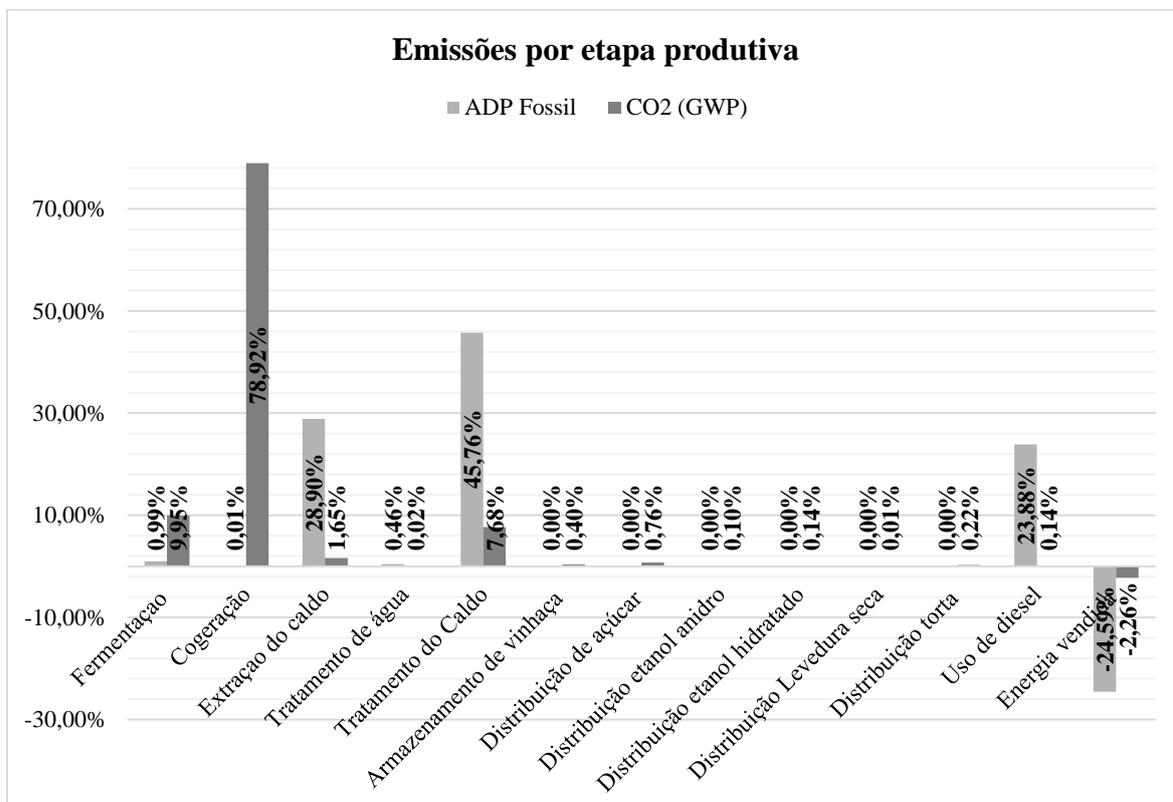
**Tabela 5** Consumo vapor por etapa produtiva

<b>CONSUMO DE VAPOR</b>			
<b>TIPO</b>	<b>ETAPA PRODUTIVA</b>	<b>Kg / t cana</b>	<b>Proporção</b>
Vapor direto	Extração do caldo	153,23	27,78%
	Cogeração	380,45	68,99%
	Fermentação	17,80	3,23%
Vapor de escape	Tratamento do caldo	445,55	94,45%
	Cogeração	8,73	1,85%
	Produção de açúcar	6,46	1,37%
	Perdas	10,99	2,33%
Vapor vegetal	Tratamento do caldo	307,50	52,11%
	Produção de açúcar	137,00	23,22%
	Extração do caldo	23,91	4,05%
	Cogeração	121,64	20,62%

Nota-se que as unidades de fabricação de açúcar e cogeração são as maiores consumidores de eletricidade. Quanto a vapores, a extração de caldo e cogeração são os principais consumidoras de vapor direto (destinado ao acionamento de turbogeradores); e a unidade de tratamento do caldo é a que mais consome vapor direto e vapor de escape, fato diretamente relacionado o elevado uso desses vapores nos evaporadores e aquecedores que produzirão xarope bruto e, posteriormente, açúcar.

### 8.1.3 - Balanços de emissões por categorias de impacto ambiental

Como citado anteriormente, as categorias de impactos ambientais avaliadas foram Potencial de Aquecimento Global e Depleção Abiótica de recursos fósseis. Os balanços se basearam no sistema de impacto ambiental CML 2001, atualizado em 2011, respectivamente Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO<sub>2</sub>-Equiv.] e Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]. Como o gás carbônico representou quase a totalidade de emissões de GWP, analisou-se o resultados referentes somente a este elemento. O Figura 33 mostra as emissões relativas de CO<sub>2</sub> e ADP fóssil para as diferentes etapas produtivas.



**Figura 33** - Contribuição de cada etapa produtiva no balanço de emissões de CO<sub>2</sub> e ADP fóssil.

Analisando as proporções de CO<sub>2</sub>, nota-se que a cogeração é responsável pela maior emissão (78,92 %) e que apresentou-se balanço negativa na etapa de venda energia (-2,26 %), resultado relacionado quantidade de emissões evitadas devido ao não uso de energia proveniente do mix brasileiro de eletricidade.

Quanto à ADP fóssil, percebe-se que as etapas que envolvem maior uso de insumos (tratamento e extração do caldo), o uso de diesel na distribuição dos produtos e venda de energia (negativo) são as etapas que apresentaram os maiores valores. Os dois primeiros casos estão relacionado ao consumo de petróleo devido ao transporte, já o último caso está relacionado a não uso de uma certa proporção de fontes fósseis incluídas no mix brasileiro de geração de eletricidade.

A Tabela 6 apresenta os resultados absolutos obtidos separando por elos da cadeia produtiva e por etapa produtiva. Analisando os resultados evidencia-se que o processo industrial, armazenamento de produtos e fornecimento de insumos contribuem praticamente na totalidade das emissões para as duas categorias, embora os resultados para ADP fóssil no uso de diesel na etapa de distribuição sejam consideráveis.

**Tabela 6** Balanço de emissões de GWP e ADP fóssil por etapa produtiva

<b>BALANÇO COMPARATIVO DE EMISSÕES</b>			
<b>Elos da cadeia produtiva</b>	<b>Etapa produtiva</b>	<b>GWP kg CO<sub>2</sub>- Equiv. / t cana</b>	<b>ADP Fossil MJ / t cana</b>
Processo industrial, armazenamento de produtos e fornecimento de insumos	Fermentação	27,65	2,48
	Geração de vapor e eletricidade	219,24	0,03
	Recepção, preparo e extração do caldo	4,59	72,56
	Tratamento de água	0,07	1,05
	Tratamento do Caldo	21,35	114,91
	Armazenamento de vinhaça	1,12	0,00
Distribuição de produtos	Distribuição de açúcar	2,12	0,00
	Distribuição de etanol anidro	0,28	0,00
	Distribuição de etanol hidratado	0,38	0,00
	Distribuição de levedura seca	0,02	0,00
	Distribuição de torta de filtro	0,62	0,00
	Uso de diesel	0,39	59,76
Processo auxiliar	Energia vendida	-6,29	-62,22
<b>TOTAL</b>		<b>271,52</b>	<b>188,59</b>

## **8.2 - Interpretação dos dados obtidos na ACV**

A interpretação do ciclo de vida é realizada na última fase. Ela é necessária para a identificação, quantificação, controle e avaliação de informações a partir dos resultados do ICV e / ou AICV. Esta fase de interpretação deve gerar um conjunto de conclusões e recomendações. Ele deve também (de acordo com a ISO 14040) levantar importantes questões ambientais, incluindo uma avaliação do estudo, considerando a sensibilidade, completude e verificações de consistência; e limitações (UNEP/SETAC, 2012).

### **8.2.1 - Análise de cenários**

A avaliação dos impactos foi realizada a partir da comparação de diferentes cenários produtivos, de forma que os resultados obtidos fossem o diagnóstico de impactos ambientais. Para isso, quantificaram-se os balanços referentes às emissões associados ao seu respectivo cenário, estes foram arbitrados baseando em projetos em fase de avaliação para implantação futura. As análises se realizarão considerando emissões de gás carbônico por ser o principal foco da empresa em seus projetos e certificações ambientais.

Os cenários foram nomeados da seguinte forma:

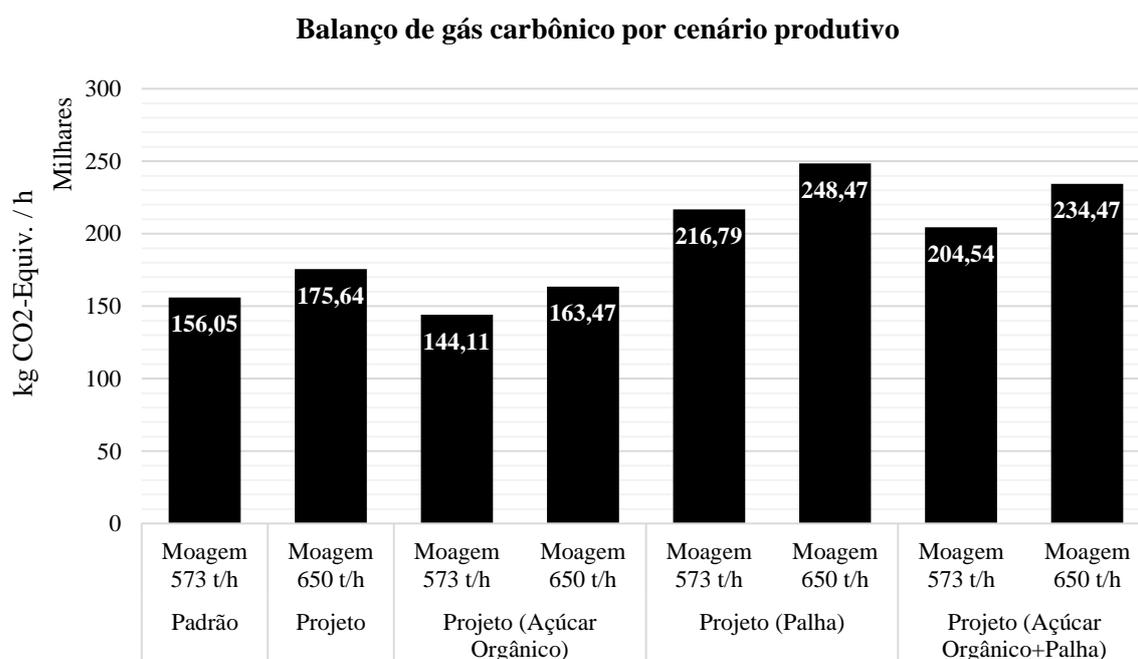
- Cenário 1 - Padrão atual: Moagem 573 t/h;
- Cenário 2 - Projeto: Moagem 650 t/h;
- Cenário 3 - Projeto: Moagem 573 t/h com produção de açúcar orgânico;
- Cenário 4 - Projeto: Moagem 650 t/h com produção de açúcar orgânico;
- Cenário 5 - Projeto: Moagem 573 t/h com utilização de palha na cogeração;
- Cenário 6 - Projeto: Moagem 650 t/h com utilização de palha na cogeração;
- Cenário 7 - Projeto: Moagem 573 t/h com produção de açúcar orgânico e utilização de palha na cogeração;
- Cenário 8 - Projeto: Moagem 650 t/h com produção de açúcar orgânico e utilização de palha na cogeração.

### **8.2.2 - Análise de emissões de dióxido de carbono por cenário produtivo**

Quantificou-se as emissões diretas e indiretas de gás carbônico associados à todas as atividades do ciclo de vida de forma a obter pegada de carbono dos produtos finais. Utilizou-se a ACV como ferramenta para cálculo do balanço de CO<sub>2</sub>, avaliando seu efeito sobre mudanças climáticas por tratar-se de um gás de efeito estufa, ou seja, obtiveram-se os resultados referentes à Potencial de Aquecimento Global (GWP) desconsiderando a ínfima

de quantidade de outros gases emitidos incluídos nessa categoria (os principais são metano e óxidos nitrosos).

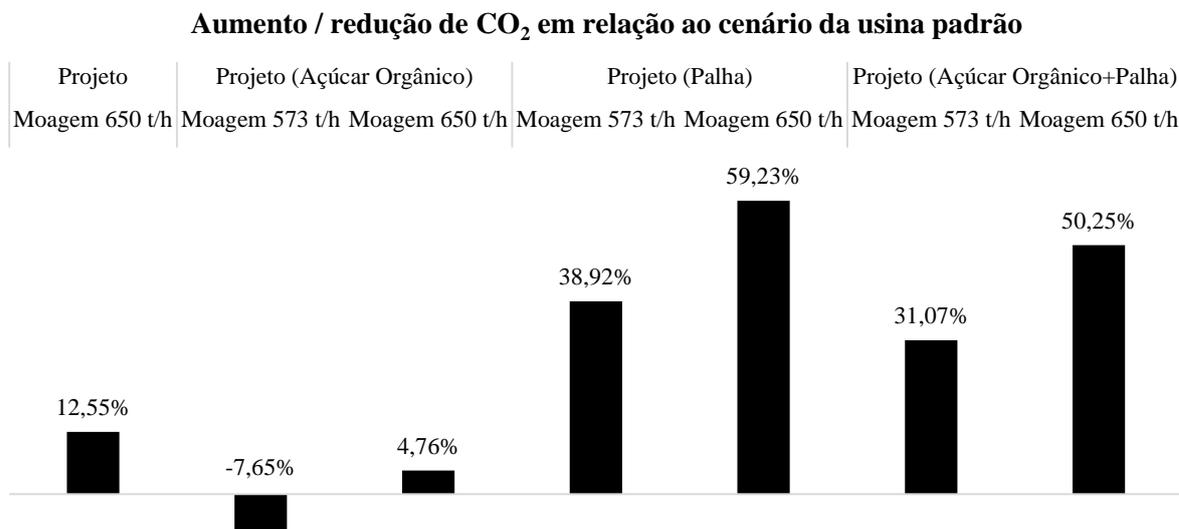
O Figura 34 mostra os balanços de CO<sub>2</sub> obtidos com a variação de cenário. Está perceptível que o aumento na capacidade de moagem e uso de palha na cogeração elevam as emissões, já a produção de açúcar orgânico contribui para a redução de emissões quando comparados a cenários similares. A elevação de emissões citadas no primeiro caso está diretamente relacionada ao aumento da queima de biomassa na caldeira e a redução citada no segundo caso deve-se à exclusão de insumos industriais para produção de açúcar orgânico principalmente na etapa de tratamento do caldo, ou seja, consequência direta da não queima de diesel nos caminhões que transportam esses insumos. Esses argumentos confirmam quando se observa que dentre todos os cenários analisado o que mais emitiu foi o que utiliza palha em uma planta de moagem 650 ton. / h (Cenário 6). Posteriormente, será avaliado a relação desse valor com a venda de energia.



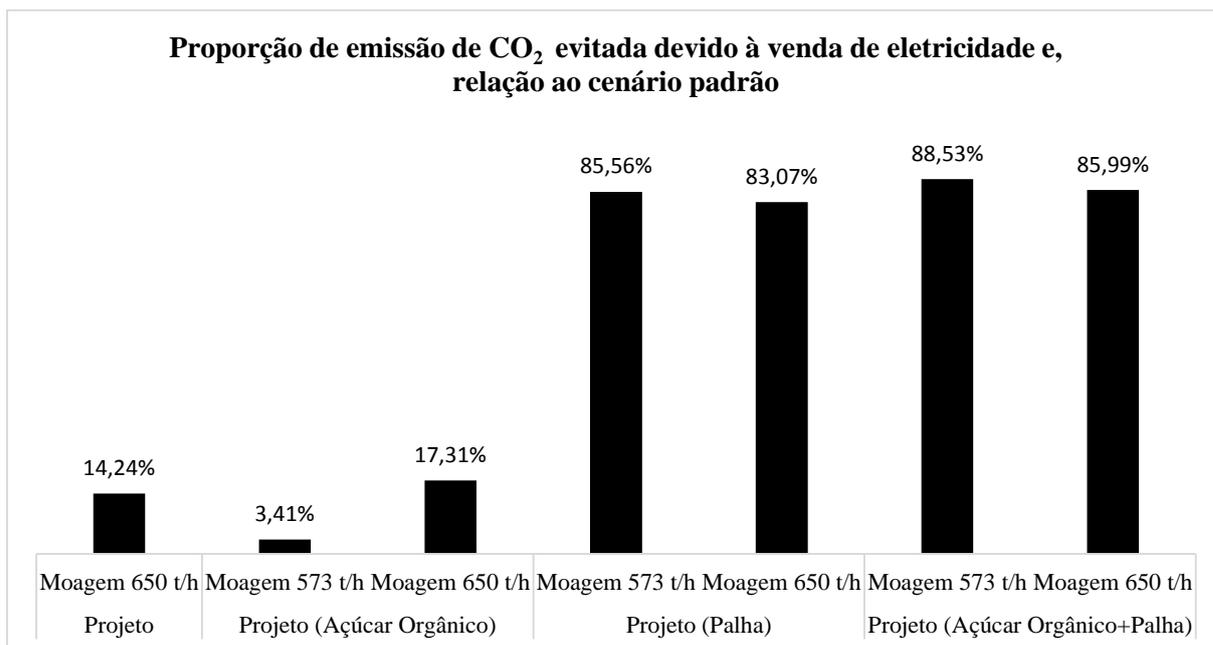
**Figura 34** - Comparação de cenários produtivos referentes a balanço de CO<sub>2</sub>.

Já a Figura 35 representa a relação aumento / redução de emissão de gás carbônico comparado ao cenário da usina padrão (cenário 1) em forma de proporção. O cenário 6 (mais impactante) emite 59,23 % a mais que o padrão. O Cenário 3, que representa a moagem 573 ton./h e produção de açúcar orgânico, é único que apresenta emissões menores que ao cenário 1. Em contrapartida, a elevação do uso de biomassa influencia diretamente na quantidade de

energia vendida (Figura 36), fato que eleva a quantidade de emissões evitadas devido ao não uso de energia da rede (balanço negativo).



**Figura 35** - Relação de aumento ou redução de emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao cenário padrão.

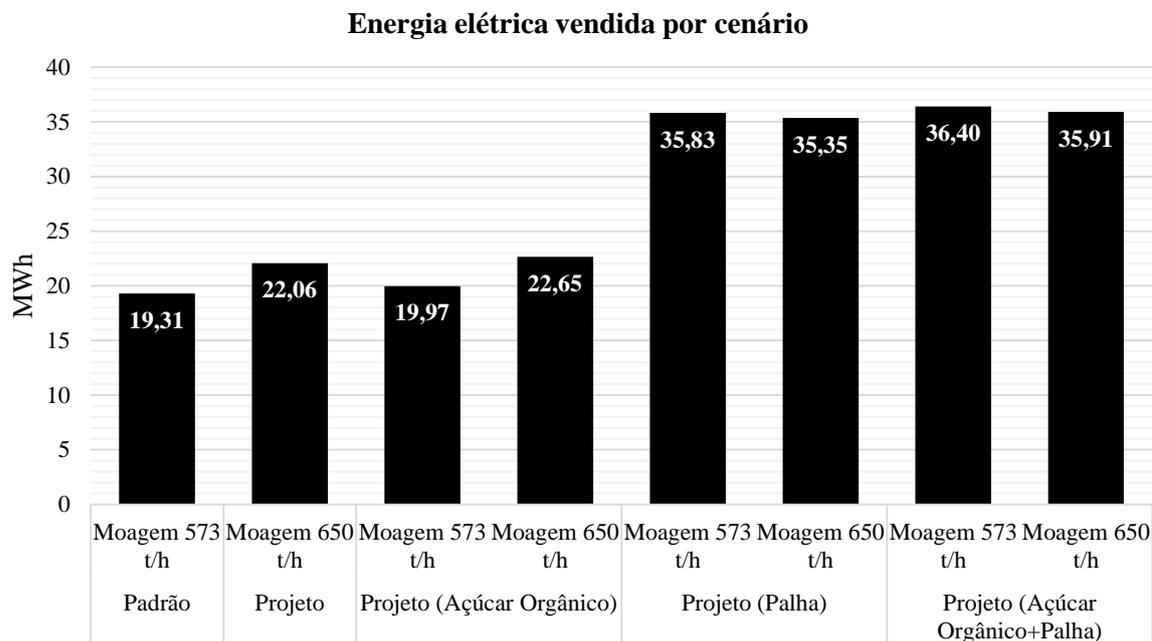


**Figura 36** - Comparativo de emissão de CO<sub>2</sub> evitada devido à venda de energia.

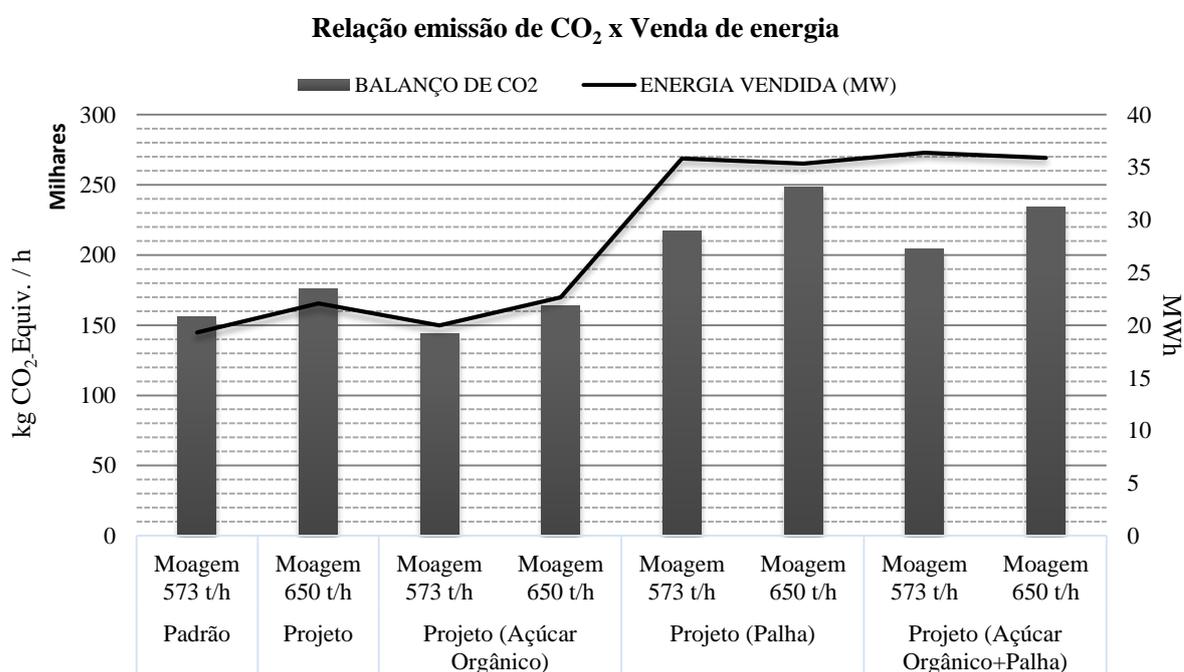
### 8.2.3 – Análise da influência da variação de cenário na comercialização de energia

O uso da palha na cogeração de energia influenciou diretamente no aumento de emissões de gases de efeitos estufa, principalmente gás carbônico. No entanto, a quantidade de energia vendida pra a rede aumentou exponencialmente em relação ao cenário padrão, fator diretamente relacionado ao aumento de receitas e de venda de créditos de carbono. A

Figura 39 mostra os valores de eletricidade vendida por cenário produtiva e o Figura 40 mostra a relação entre aumento de emissões e aumento de venda de eletricidade.



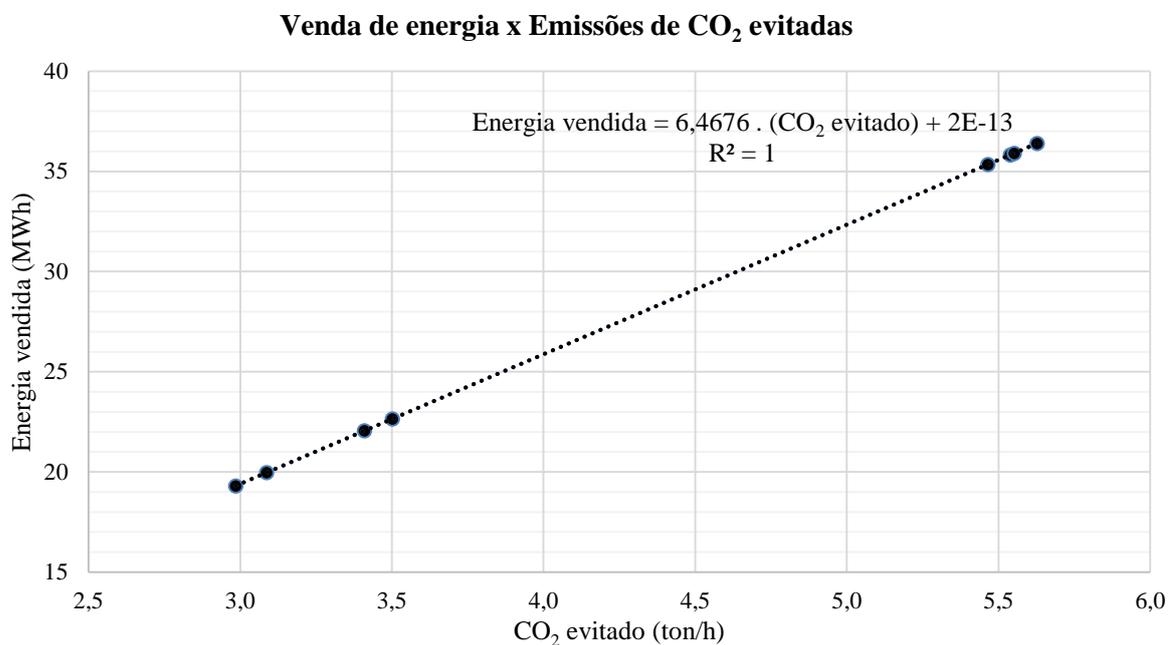
**Figura 37** - Diagrama de venda de energia eletricidade por cenário produtivo.



**Figura 38** - Relação entre emissões de CO<sub>2</sub> e venda de eletricidade.

A cogeração de energia elétrica é considerada uma tecnologia limpa, emitindo menos gases de efeito estufa quando comparada às termoelétricas a gás natural ou a óleo. Essa redução pode ser mensurada relacionando com a quantidade de CO<sub>2</sub> que deixa de ser emitida, gerando o crédito de carbono para ser comercializado. Logo, a venda de energia elétrica é

uma fonte valiosa para venda de créditos de carbono pelo fato dela estar diretamente relacionada ao aumento de emissão de CO<sub>2</sub> evitado. A Figura 39 comprova que essas duas variáveis estão diretamente relacionadas, observa-se fator de correlação máximo.

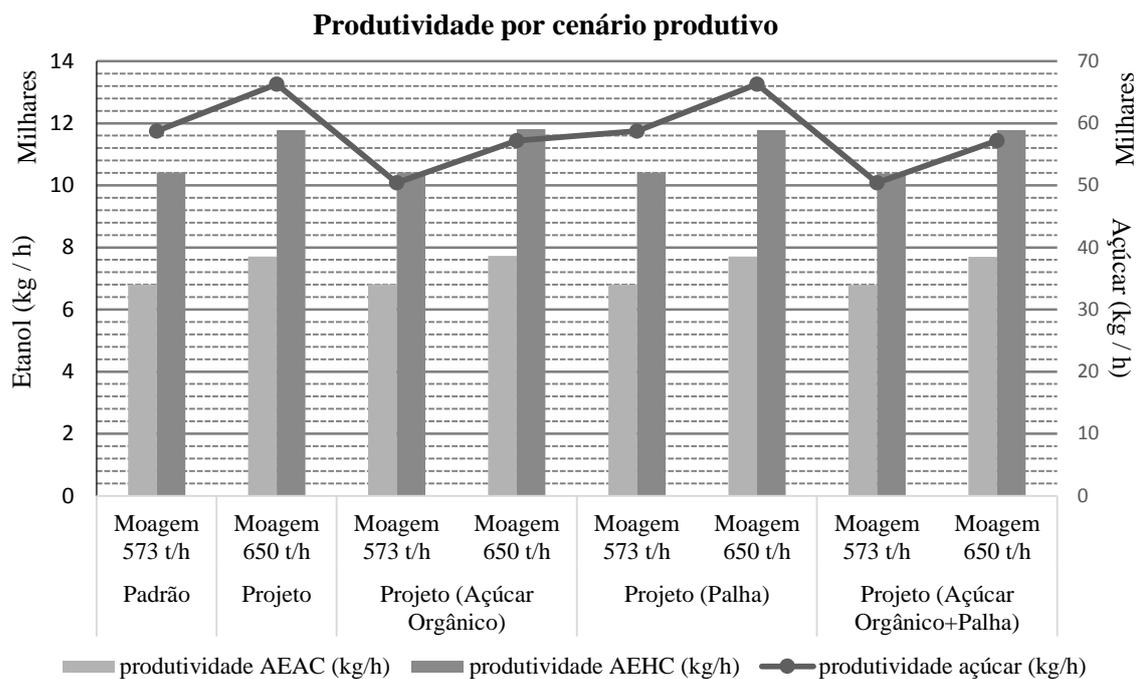


**Figura 39** - Relação entre emissões evitadas de CO<sub>2</sub> e venda de eletricidade.

Essa relação é considerada importante para tomadas de decisões estratégicas no setor sucroalcooleiros, já que relaciona duas fontes de lucro: venda de energia e créditos de carbono. A controvérsia reside no fato que mesmo a com o aumento de emissão CO<sub>2</sub> evitado, o balanço final de CO<sub>2</sub> se eleva em proporção significativamente superior. Logo, a usina ideal seria aquela que houvesse um nível ótimo que harmonize aumento de venda de energia com balanço de CO<sub>2</sub> zero.

#### 8.2.4 - Análise de produtividade por cenário produtivo

Outro fator que não pode ser desconsiderado na relação custo financeiro / benefício ambiental é a produtividade de etanol e açúcar, os principais produtos de comercialização de uma usina. É essencial contrabalançar os resultados obtidos nos cenários no quesito emissões, venda de energia e produtividade. Em termos empresariais, o investidor buscará a situação que equilibre essas variáveis, ou seja, não basta somente atender a uma expectativa de potenciais resultados em um projeto, sem considerar fatores interligados direta ou indiretamente. A Figura 40 apresenta a produtiva por cenário produtivo.



**Figura 40** - Influência da variação de cenário na produtividade de açúcar e etanol.

Observa-se que as variações de produtividade são mais representativas no caso do açúcar, fato diretamente relacionado à diminuição de produtividade quando se destina à produção de açúcar orgânico.

No caso o etanol, a única variação de cenário que influencia em sua produtividade é aumento de capacidade de moagem, pois a palha utilizada na cogeração não influencia na produção da destilaria nem a produção de açúcar orgânico. Haveria variação na produtividade de etanol somente se determinada parcela de palha e bagaço fosse destinada à produção de etanol de segunda geração ou se fosse utilizado o cultivo de algas para de produção de etanol a partir do CO<sub>2</sub> gerado na usina.

### 8.2.5 - Análise de *trade-off*: emissões de CO<sub>2</sub> x produtividade x venda de energia

Os resultados obtidos nos itens anteriores levam à reflexão acerca dos *trade-offs*<sup>20</sup> envolvidos decisão de qual cenário é mais benéfico para a usina em termos econômicos e ambientais. O conflito empresarial mais recorrente no contexto de redução de emissões de dióxido de carbono está relacionado à influência direta da inserção de um política ambiental nos dividendos, ou seja, atingir um ponto de equilíbrio entre redução de emissões e retorno

<sup>20</sup> *Trade-off* pode ser entendido como a relação entre os custos/benefícios para melhoria de algo que trará benefícios futuros para uma organização, quando duas decisões entram em conflito mútuo.

financeiro. A aplicação direta dessa questão neste estudo reside na análise da relação entre emissões de CO<sub>2</sub>, produtividade e venda de energia.

Como produtividade de etanol e açúcar e venda de energia são duas variáveis diretamente relacionada à comercialização, é essencial a realização de avaliações minuciosas de viabilidade de investimentos pelo fato delas não terem relação linear positiva com a variável CO<sub>2</sub>. A Tabela 7 mostra essas relações no contexto do estudo.

**Tabela 7** - Relação entre emissões de CO<sub>2</sub>, produtividade e venda de energia.

CENÁRIOS	Produtividade				BALANÇO CO <sub>2</sub> (kg/h)
	Açúcar* (kg/h)	AEAC** (kg/h)	AEHC*** (kg/h)	Energia venda (MW)	
Cenário 1	58 744,17	6 806,18	10 407,09	19,31	156 051,26
Cenário 2	66 293,58	7 706,48	11 783,70	22,06	175 640,84
Cenário 3	50 401,08	6 808,44	10 410,54	19,97	144 107,60
Cenário 4	57 174,00	7 723,36	11 809,52	22,65	163 472,85
Cenário 5	58 744,17	6 806,18	10 407,09	35,83	216 789,50
Cenário 6	66 293,58	7 706,48	11 783,70	35,35	248 474,87
Cenário 7	50 401,08	6 789,59	10 381,72	36,40	204 538,27
Cenário 8	57 174,00	7 701,97	11 776,82	35,91	234 467,61

\* Açúcar Cristal e Orgânico, varia com o cenário; \*\* Etanol anidro; \*\*\*Etanol hidratado.

A partir dos custos unitários de venda desses produtos analisados pode-se obter uma estimativa do retorno financeiro total, podendo também incluir a variável venda de créditos de carbono e propor uma conjuntura que reduza ou anule o balanço de CO<sub>2</sub>, tal como inserção de algas produtoras de etanol, que absorve CO<sub>2</sub> e eleva a produtividade de etanol.

## 9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo demonstrou que a metodologia de Avaliação de Ciclo Vida é uma ferramenta poderosa de diagnóstico de desempenho ambiental e econômico, sendo uma importante solução no âmbito de sistemas de apoio à tomada de decisões estratégicas não somente para Usina Jalles Machado S/A, como também para todo o setor sucroalcooleiro. Além de todos os resultados terem contribuído para que fosse possível visualizar os elos da cadeia produtiva, o estudo sugeriu novos projetos industriais e apresentou uma estimativa teórica de como as mudanças incluídas no modelo da usina padrão influenciariam nos resultados de interesse. Logo, importante passo foi dado para que futuramente a usina se atente à questões importantes como obtenção novas rotulagens ambientais, inserção de modificações tecnológicas e acompanhamento cotidiano dos índices ambientais.

Analisando os resultados da usina padrão, nota-se que a etapa de cogeração de energia é foi que apresentou os maiores resultados em todas as questões avaliadas, ou seja, maior consumo de água, de eletricidade e de vapor e maiores emissões de gases com potencial de aquecimento global (principalmente dióxido de carbono). A única exceção seria quanto à depleção de recursos fósseis, sendo a etapa de tratamento do caldo a mais impactante devido à quantidade de insumos utilizados e, conseqüentemente, maior consumo de diesel nos caminhões que as transportam. Logo, a inserção da produção de açúcar orgânico contribui diretamente com a redução de ADP fóssil por eliminar várias etapas de transporte, principalmente na etapa de tratamento do caldo (não clarificação do caldo), embora a avaliação dessa categoria não tenha sido realizado nas análises de cenários.

Quanto à análise de cenários, os resultados apontam o que cenário que combina uso de palha com moagem 650 t/h (cenário 6) é o que mais emite CO<sub>2</sub>, por ser a combinação que mais gera energia, embora não seja o cenário que mais comercializa eletricidade. O cenário 7 (uso de palha com moagem 650 t/h e produção de açúcar orgânico) foi o que mais apresentou potencial de comercializa eletricidade, isso porque se utiliza palha mas consome menos energia na indústria em relação aos outros que também usam palha por ter moagem menos eficiente e produzir açúcar orgânico (diminui consumo de energia e água), ou seja, sobra mais energia para comercialização. No quesito produtividade, nota-se que a do etanol varia com o aumento da eficiência de moagem e do açúcar varia com a inserção de produção de açúcar orgânico.

Considerando o grande potencial de elevação de lucro, o uso da palha na cogeração é uma alternativa interessante. No entanto, deve-se adotar soluções que neutralizem o grande aumento de emissões em relação à usina padrão (vide Figura 36). Uma delas seria o cultivo de algas capazes de produzir etanol ou biodiesel e absorver dióxido de carbono. Logo, a inclusão desse projeto seria uma opção bastante atraente à usina para trabalhos futuras. A avaliação da inserção da produção de etanol de segunda geração também um importante aspecto a ser analisado no contexto das avaliações realizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-AMIN, A. Q., SIWAR, C., & JAAFAR, A. H. (2009). Energy use and environment impact of new alternative fuel mix in electricity generation in Malaysia. *The Open Renewable Energy Journal* 2, pp. 25–32.
- ANDRADE, J. M., & DINIZ, K. M. (2007). Impactos Ambientais da Agroindústria da Cana-de-açúcar: Subsídios para a Gestão. *Especialização em Gerenciamento Ambiental (Monografia)*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo.
- BEEHARRY, R. P. (2001). Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. *Biomass and Bioenergy* 20, pp. 361–370.
- BERTONCINI, E. I. (2008). Geração de Resíduos da Indústria da Cana-de-açúcar. *Workshop: Aspectos ambientais da cadeia do etanol de cana-de-açúcar* (p. 18 p). Piracicaba: Programa de Pesquisa em Políticas Públicas (PPPP).
- BIANCHINI, V. K., & ASSUMPCÃO, M. R. (2002). A diferenciação de produtos na cadeia produtiva do açúcar: o processo de produção dos açúcares líquido e líquido invertido. *XXII Conferência Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP*. Curitiba: Anais.
- BIZZO, W. A. (n.d.). Cap 4 - GERADORES DE VAPOR. In *Geração, Distribuição e Utilização de Vapor* (pp. 66-80). Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - Unicamp.
- BJÖRKLUND, A. E. (2002). Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7 (2), pp. 64-72.
- BOTHA, T., & BLOTTNITZ, H. v. (2006). A comparison of the environmental benefits of bagasse-derived electricity and fuel ethanol on a life-cycle basis. *Energy Policy* 34, pp. 2654–2661.
- BRAUNBECK, O. A., & NETO, E. A. (2010). Logística de transporte de matéria-prima e resíduos da cana-de-açúcar. In L. A. (coordenador), *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade* (pp. 487-504). São Paulo: Blucher.
- BUCKERIDGE, M. S., SOUZA, A. P., ARUNDALE, R. A., ANDERSON-TEIXEIRA, K. J., & DELUCIA, E. (2011). Ethanol from sugarcane in Brazil: a ‘midway’ strategy for increasing ethanol production while maximizing environmental benefits. *GCB Bioenergy*, pp. 1757-1707.
- BUENO, M. S. (2012). Análise da cadeia logística de exportação de açúcar. *Resenha de dissertação de Mestrado*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo.
- CALDEIRA-PIRES, A., VILELA, F. S., LUZ, S. M., PALMA-ROJAS, S., RODRIGUES, T. O., SILVÉRIO, V. C., . . . ALVES, A. M. (2013). Sustainability of the Biorefinery Industry for Fuel Production. *Energies* 6,, pp. 329-350.

- CAMARGO, C. A., & USHIMA, A. H. (1990). *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool: Manual de recomendações*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- CARMO, V. B. (2008). Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar - fase industrial. *Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas - FAPESP*. Campinas: Unicamp.
- CARVALHO, A. P. (2011). Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimento: análise da indução e implementação de práticas socioambientais por uma empresa brasileira do setor de cosméticos. *Doutorado em Administração de Empresas (Tese)*. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas (FGV).
- CAVALETT, O., CHAGAS, M. F., SUGAWARA, E. T., SEABRA, J. E., CARDOSO, T. F., & FRANCO, H. J. (2012). Inventário de ciclo de vida da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil. *Anais* (pp. 280-286). Maringá: III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços.
- CGEE, C. d., & BNDES, B. N. (2008). *Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: BNDES.
- CHAUHAN, M. K., VARUN, S. C., & SUNEEL KUMAR, S. (2011). Life cycle assessment of sugar industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 3445– 3453.
- CHOHFI, F. M. (2004). Balanço e análise de emissão e sequestro de CO<sub>2</sub> na geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro. *Mestrado em Engenharia de Energia (dissertação)*. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá.
- CML (2001). *An operational guide to the ISO-standards - Part 3: Scientific Background (Final Report)*. Leiden: Leiden University.
- COELHO, S. T., LORA, B. A., & GUARDABASSI, P. M. (2010). Aspectos ambientais da cadeia do etanol de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In L. A. CORTEZ, *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade* (pp. 241-253). São Paulo: Blucher.
- CONAMA. (1986, janeiro 23). RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001.
- CONTRERAS, A. M., ROSA, E., PÉREZ, M., & LANGENHOVE, H. V. (2009). Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production* 17, pp. 772–779.
- COPERSUCAR. (1998). Economia de Vapor em Usinas de Açúcar; Qualidade da Palha; Enfardamento da Palha; Recuperação e Transporte dos Fardos. *Geração de Energia por Biomassa - Bagaço da Cana-de-açúcar e Resíduos*. Piracicaba, São Paulo, Brasil: Informativo do Centro de Tecnologia Copersucar.
- CORTEZ, L. A., LORA, E. E., & GÓMEZ, E. O. (2008). *Biomassa para energia*. Unicamp: Editora Unicamp.

- CORTEZ, L. A., ROSSELI, C. E., JORDAN, R. A., LEAL, M. R., & LORA, E. E. (2010). NECESSIDADES DE P&D NA ÁREA INDUSTRIAL EM VINHAÇA. In L. A. CORTEZ (2010), *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade* (pp. 619-636). São Paulo: Blucher.
- COSTA, B. P. (2007). Aspectos logísticos do escoamento do açúcar paulista: trecho usina-porto de Santos. *Pós graduação em Engenharia de Produção (Dissertação de Mestrado)*. São Carlos, SP: Universidade Federal de São Carlos.
- CTC, C. d. (1990). *I Seminário de Tecnologia Industrial*. Piracicaba: Anais.
- DEDINI. (2009). Indústria de base. *Folheto técnico sobre energia*.
- ELSAYED, M., MATTHEWS, R., & MORTIMER, N. (2003). *Carbon and energy balances for a range of biofuels options*. Sheffield Hallam University, UK: Resources Research.
- EMBRAPA (2008). *Sistema de Produção de Destilado de Vinho*. Retrieved janeiro 7, 2013, from <http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/sprod/DestiladoVinho/destilacao.htm>
- ENSINAS, A., NEBRA, S., LOZANO, M., & SERRA, L. (2006). Optimization of thermal energy consumption in sugarcane factories. *19th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems* (pp. 569–76). ECOS 2006.
- FIGUEIREDO, R. (2006). *Gargalos logísticos na distribuição de combustíveis brasileira*. Retrieved outubro 14, 2012, from [http://www.ilos.com.br/web/index.php?option=com\\_content&task=view&id=699&Itemid=74](http://www.ilos.com.br/web/index.php?option=com_content&task=view&id=699&Itemid=74)
- FILHO, L. G., & MACEDO, I. C. (2010). Contribuição do etanol para a mudança do clima. In U. –U. Cana-de-açúcar, *Etanol e Bioeletricidade A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética* (pp. 77-96). São Paulo: Luc Projetos de Comunicação.
- FOX, R. W., & McDONALD, A. T. (2001). *Introdução à Mecânica dos Fluidos (5 ed)*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora.
- FRISCHKNECHT, R., HEIJUNGS, R., & HOFSTETTER, P. (1998). Einstein's lessons for energy accounting in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 3 (5): 85-95.
- GARCÍA, C. A., FUENTES, A., HENNECKE, A., RIEGELHAUPT, E., & MANZINI, F. (2011). Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy* 88, pp. 2088–2097.
- Global Ecolabelling Network, (. (2013). Retrieved janeiro 17, 2013, from <http://www.globalecolabelling.net/>

- GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., & GUARDABASSI, P. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* 36 , pp. 2086– 2097.
- HABIB, E., RIVERA-MONROY, V. H., WANG, J., MESELHE, E. A., GAUTAM, S., MOSER, B., & JESCH, C. (n.d.). An uncertainty analysis framework for the clear ecosystem model: using Barataria Basin as test domain and skill assessment. In *CLEAR LCA Model* (pp. 129–133). Volume III: Final Report (chapter 6).
- HEIJUNGS, R., & GUINÉE, J. B. (1995). On the usefulness of life cycle assessment of packaging. *Environmental Management*, 19 (5): 665-668.
- HEIJUNGS, R., GUINÉE, J., HUPPES, G., LANKREIJER, R. M., UDO DE HAES, H. A., WEGENER SLEESWIJK, A., . . . de GOEDE, H. P. (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds*. Leiden: Leiden University.
- HORTA, L. A. (2006). *Costos y precios para etanol en Centro América. Cidade do México: Proyecto Cepal/ Gobierno de Italia*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/files/brochure\\_ecodesign\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/files/brochure_ecodesign_en.pdf). (2012). *Ecodesign your future: How Ecodesign can help the environment by making products smarter*. União Européia. Retrieved from [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/files/brochure\\_ecodesign\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/files/brochure_ecodesign_en.pdf)
- HUGOT, É. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering*. Amsterdã: Elsevier.
- Institute for Environment and Sustainability, I. (2010). *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. União Européia: Joint Research Centre (JRC).
- Institute for Environment and Sustainability, I. (2010). *ILCD Handbook: Specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets*. União Européia: Joint Research Centre (JRC).
- ISO 14040, (2006). *Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO 14044, (2006). *Environmental management – life cycle assessment – Requirements and Guidelines*. International Organization for Standardization.
- JANNUZZI, G. D. (2010). Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar. In L. A. CORTEZ, *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade* (pp. 272-277). São Paulo: Blucher.
- JANOTTI, P. R., RODRIGUES, I. C., RODRIGUES, A. M., & REBELATO, M. G. (2012). A logística do açúcar e do etanol entre usinas paulistas e o Porto de Santos: um estudo comparativo entre agentes comerciais. *Revista de Administração da UNIMEP*, 1-26.

- JAVALAGI, C. M., PATIL, H. R., & BHUSHI, U. M. (2010). Statistical modeling of steam generation for cogeneration in Indian sugar industry: a case study. *Cogeneration & Distributed Generation Journal* 25(1), pp. 18–34.
- KIATKITTIPONG, W., WONGSUCHOTO, P., & PAVASANT, P. (2009). Life cycle assessment of bagasse waste management options. *Waste Management* 29, pp. 1628–1633.
- KOEHLER, A. (2008). Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources. *International Journal Life Cycle Assessment* 13, pp. 451–455.
- KUMAR, D., & MURTHY, G. S. (2012). Life cycle assessment of energy and GHG emissions during ethanol production from grass straws using various pretreatment processes. *International Journal Life Cycle Assessment* 17, pp. 388–401.
- LEAL, M. R. (2007). *The potential of sugarcane as an energy source*. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists.
- LEAL, M. R. (2010). Evolução Tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In C. L. Cortez, *Bioetanol de cana-de-açúcar: P & D para produtividade e sustentabilidade* (pp. 561-575). São Paulo: Blucher.
- LEIDEN, U. o. (n.d.). *CML, 2001. An operational guide to the ISO-standards - Part 3: Scientific background (Final report, May 2001)*. Retrieved janeiro 6, 2013, from [www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html#gb](http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html#gb)
- LEITE, H. T. (2008). A sustentabilidade e o uso da água. *Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas* (p. 9 p). Campinas: Workshop.
- LIMA, L. d., FILHO, H. J., & CHAVES, F. J. (2006). Determinação de demanda bioquímica de oxigênio para teores menor ou igual 5 mg/L O<sub>2</sub>. *Revista Analytica*, 52-57.
- LORA, B. A. (2008). Potencial de geração de créditos de carbono e perspectivas de modernização do setor sucroalcooleiro do Estado de São Paulo através do mecanismo de desenvolvimento limpo. *Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (dissertação de mestrado)*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- LUCON, O. S. (2008). Aspectos ambientais da cadeia do etanol de cana-de-açúcar. *Termo de Referência - Workshop Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar*. São Paulo: Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo.
- LUNA, M. M. (2007). Operadores logísticos. In A. G. NOVAES, *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição* (p. 3 ed). Rio de Janeiro: Elsevier.
- LUO, L., VOET, E. v., & HUPPES, G. (2009). Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, pp. 1613–1619.

- LUZ, S. M., VILELA, F. S., CALDEIRA-PIRES, A., & RODRIGUES, T. O. (2013). Life cycle assessment of brazilian biodiesel. *Anais*. Mendoza, Argentina: V International Conference on Life Cycle Assessment in Latin-America.
- MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., & SILVA, J. E. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, 582-595.
- MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., & SILVA, J. E. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy* 32, pp. 582 – 595.
- MACEDO, I. d., LEAL, M. R., & SILVA, J. E. (2004). *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente - Governo do Estado de São Paulo.
- MACEDO, L. e. (2006). *Geração de energia elétrica e de gás de síntese a partir de gaseificação de biomassa*. Campinas: Fucamp/Unicamp-Nipe/LH2 e Petrobras/Cenpes-Finep.
- MALÇA, J., & FREIRE, F. (2006). Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. *Energy Volume 31, Issue 15*, pp. 3362–3380.
- MARQUES, P. (2009). *Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008*. Piracicaba: Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA).
- MEDEIROS, M. A., VENDEMIATTI, J. A., SOBRINHO, G. D., & ALBUQUERQUE, A. F. (2006). Disciplina ST 405 – Química sanitária e laboratório de saneamento. *Apostila de laboratório*. Limeira: Unicamp.
- MEIRELLES, J. A. (2006). Expansão da Produção de Bioetanol e Melhoria Tecnológica da Destilação Atmosférica. *Workshop “Produção de Etanol”*. São Paulo: EEL/USP.
- MITSUTANI, C. (2010). Logística de etanol de cana-de-açúcar no Brasil: condicionantes e perspectivas. *Programa de pós-graduação em energia (dissertação de Mestrado)*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- MMA. (2013). *Protocolo de Quioto*. Retrieved janeiro 20, 2013, from <http://www.mma.gov.br/clima/protocolo-de-quioto>
- MOREIRA, J. R., & GOLDEMBERG, J. (1999). The alcohol program. *Energy Policy Volume 27, Issue 4*, pp. 229–245.
- MOREIRA, J., & GOLDEMBERG, J. (2005). *Política energética no Brasil*. São Paulo: Estudos avançados.

- MORTIMER, N. D., CORMACK, P., ELSAYED, M. A., & HORNE, R. E. (2003). *Evaluation of the comparative energy, global warming and social costs and benefits*. Sheffield Hallam University, UK: Resource Research Unit.
- NETO, V. C. (2001). Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa. *Dissertação (Mestrado) - COPPE*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NEVES, M. F., TROMBIN, V. G., & CONSOLI, M. (2010). O mapa sucroenergético do Brasil. In U. –U. Cana-de-açúcar, *Etanol e bioeletricidade : a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética* (pp. 14-43). São Paulo: Luc Projetos de Comunicação.
- NGUYEN, T. L. (2008). Fuel ethanol from cane molasses in Thailand: environmental and cost performance. *Energy Policy* 36:15, pp. 89–99.
- NUNES, P. B. (2010). Caracterização logística do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar no centro-sul do Brasil. *Graduação em Ciências Econômicas (monografia)*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade São Paulo.
- NYKO, D., XAVIER, C. E., MILANEZ, A. Y., & GARCIA, J. L. (2010). Logística para o etanol: situação atual. In BNDES, *BNDES Setorial 31- Sucroenergético* (pp. 49-98). Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, A. B. (2010). Análise Prospectiva da Utilização de uma Usina como Plataforma para uma Biorefinaria. *Escola de Economia de São Paulo*. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas.
- OMETTO, A. R. (2005). Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia. *Tese (Doutorado) - Engenharia (Hidráulica e Saneamento)*. São Carlos: Universidade de São Paulo.
- OMETTO, A. R., HAUSCHILD, M. Z., & ROMA, W. N. (2008). Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess* 14, pp. 236–247.
- PAYNE, J. H. (1989). *Operações unitárias na produção de cana-de-açúcar*. São Paulo: Nobel / STAB.
- PELLEGRINI, L. F. (2009). Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade. *Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- PIACENTE, F. J. (2010). Inovação e Trajetórias Tecnológicas: o caso dos dois sistemas para extração de sacarose no Brasil. *Tese (Doutorado)*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia.
- PRIETO, M. G. (2003). Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso. *Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.

- PROCKNOR. (2001). Cogeração de Energia Elétrica com Difusor. *Revista STAB*. São Paulo: STAB.
- RAMALHO, J. F., & AMARAL-SOBRINHO, N. M. (2001). Metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. *Revista Floresta e Ambiente*, 229-264.
- RAMOS, R. P. (2010). Modelo matemático para custo e energia na produção de açúcar e álcool. *Dissertação de Mestrado em Agronomia*. Botucatu: Unesp.
- REGAN, H. M., COLYVAN, M., & BURGMAN, M. A. (2002). A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecological Applications* 12(2), pp. 618–628.
- RODRÍGUEZ, M. F. (2010). Uso de Água na Produção de Etanol de Cana-de-açúcar. *Dissertação de Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos, Unicamp*. Campinas.
- ROJAS, S. P. (2012). Contribuição do Enfoque de Ciclo de Vida da Ecologia Industrial na Economia do Meio Ambiente. *Doutorado em Economia (Tese de Doutorado)*. Brasília: Universidade de Brasília.
- SCANDIFFIO, M. I. (2005). Análise Prospectiva do Álcool Combustível no Brasil - Cenários 2004-2024. *Tese de Doutorado*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- SCANDIFFIO, M. I. (2008). Infra-Estrutura e Logística de Transporte de Cana e Etanol. *NIPE-Unicamp*, pp. 1-15.
- SEABRA, J. E. (2008). Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações. *Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica*. Campinas: Universidade de Campinas.
- SEABRA, J. E., MACEDO, I. C., CHUM, H. L., FARONI, C. E., & SARTO, C. A. (2011). Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 5:, pp. 519–532.
- SETTEN, A. D. (2010). Infraestrutura logística de exportação de etanol e açúcar no centro-sul do país. *Escola de Economia de São Paulo – EESP (dissertação de Mestrado)*. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas.
- SMEETS, E., JUNGINGER, M., FAAIJ, A., WALTER, A., DOLZAN, P., & TURKENBURG, W. (2008 ). The sustainability of Brazilian ethanol—An assessment of the possibilities of certified production. *Biomassa and Bioenergy* 32, pp. 781 – 813.
- SOARES, L. H., ALVES, B. J., URQUIAGA, S., & BODDEY, R. M. (2009). Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Circular 27*. Seropédica, RJ: Embrapa.

- The potential of sugarcane as an energy source. (2007). *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*.
- UNEP. (2007). *Life Cycle Management: A Business Guide to Sustainability*. United Nations Environment Programme.
- UNEP/SETAC, L. C. (2009). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNEP/SETAC, L. C. (2010). *Life Cycle Management: How business uses it to decrease footprint, create opportunities and make value chains more sustainable*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNEP/SETAC, L. C. (2011). *Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: A basis for greener processes and products*. United nations environment programme (UNEP).
- UNEP/SETAC, L. C. (2012). *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices*. United Nations Environmental Programme (UNEP).
- UNICA. (2013). *A sustentabilidade no setor sucroenergético energético*. Retrieved JANEIRO 28, 2013, from <http://www.unica.com.br/sustentabilidade.php>
- UNICAMP, & CGEE. (2009). *Bioetanol combustível: uma oportunidade par o Brasil*. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).
- USINA SANTA ELISA. (2011). Retirado de <http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/files/2rE011/10/PocessoProdutivoEtanol.pdf>
- VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., & BORGNACKE, C. (2003). *Fundamentos da Termodinâmica*. São Paulo: Edgard Blücher.
- VARUN; I.K. BHAT; Ravi PRAKASH. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 13*, pp. 1067–1073.
- VILELA, F. S., CALDEIRA-PIRES, A. A., & LUZ, S. M. (2011). Metodologia de avaliação de impacto ambiental aplicado à produção de etanol. *Anais*. Curitiba: 6º Congresso Internacional de Bioenergia.
- VILELA, F. S., CALDEIRA-PIRES, A. A., & LUZ, S. M. (2012). Avaliação de custos de ciclo de vida ao longo da cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar no Brasil. *Anais* (pp. 84 - 89). Maringá: III Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida de Produtos e Serviços.
- VILELA, F. S., CALDEIRA-PIRES, A. A., & LUZ, S. M. (2013). Economic and environmental impacts assessment along the supply chain of anhydrous ethanol from sugarcane in Brazil. *V International Conference on Life Cycle Assessment in Latin-America* (p. 9 p). Mendoza, Argentina: CILCA 2013.

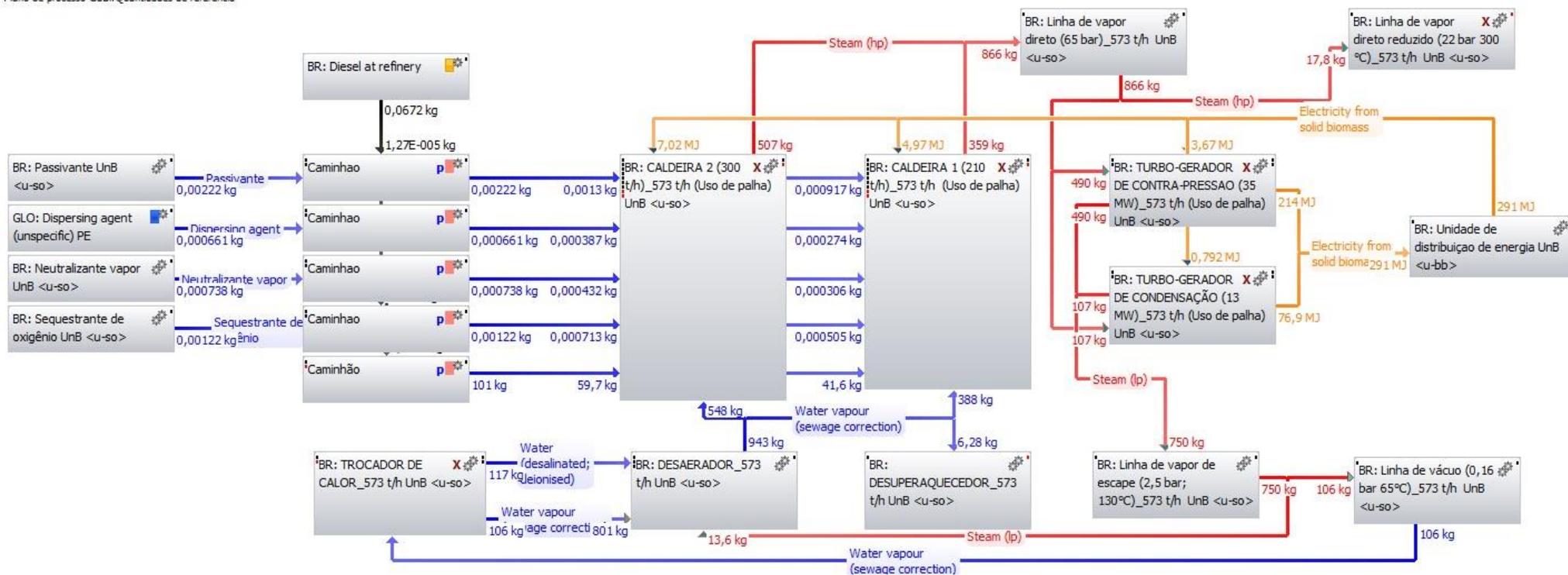
- VILELA, F. S., CALDEIRA-PIRES, A. A., LUZ, S. M., & WOLFF, S. S. (2012). Análise de desempenho ambiental ao longo da cadeia de suprimentos do etanol anidro no Brasil. *Anais*. São Paulo: VII Congresso Internacional de Bioenergia.
- VILELA, F. S., ROGRIGUES, T. O., LUZ, S. M., & CALDEIRA-PIRES. (2012). Análise comparativa de impactos ambientais provenientes da produção de biodiesel de dendê e etanol de cana-de-açúcar. *Anais* (pp. 1739 - 1740). Salvador: V Congresso da rede brasileira de tecnologia de biodiesel.
- WEIDEMA, B. (2000). Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology* 4:11–33., pp. 11–33.
- WEIDEMA, B., FRESS, N., PETERSEN, E., & ØLGAARD, H. (2003). *Reducing uncertainty in LCI: developing a data collection strategy*. Denmark: Environmental.
- XAVIER, C. E. (2008). Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil: aplicação de um modelo matemático de otimização. *Mestrado em Ciências (Dissertação)*. Piracicaba: Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".
- YU, S., & TAO, J. (2009). Economic, energy and environmental evaluations of biomass-based fuel ethanol projects based on life cycle assessment and simulation. *Applied Energy* 86, pp. 178–188.
- ZANÃO, A. G. (2009). Caracterização da infra-estrutura de armazenagem de álcool no Brasil e análise da sua concentração na Região Centro-Sul. *Mestrado em Ciência (dissertação)*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luz de Queiroz" - Universidade de São Paulo.
- ZANDBERGEN, P. (1993). Energy and environmental policy in Latin America: the case of fuel ethanol in Argentina and Brazil. *Master Science (dissertação)*. Enschede, Holanda: University of Twente.

## **ANEXOS**

# A - FLUXOGRAMA GaBi DA ETAPA DE GERAÇÃO DE VAPOR E ELETRICIDADE COM USO DE PALHA

## Geração de vapor e eletricidade\_573 t/h (Uso de palha)

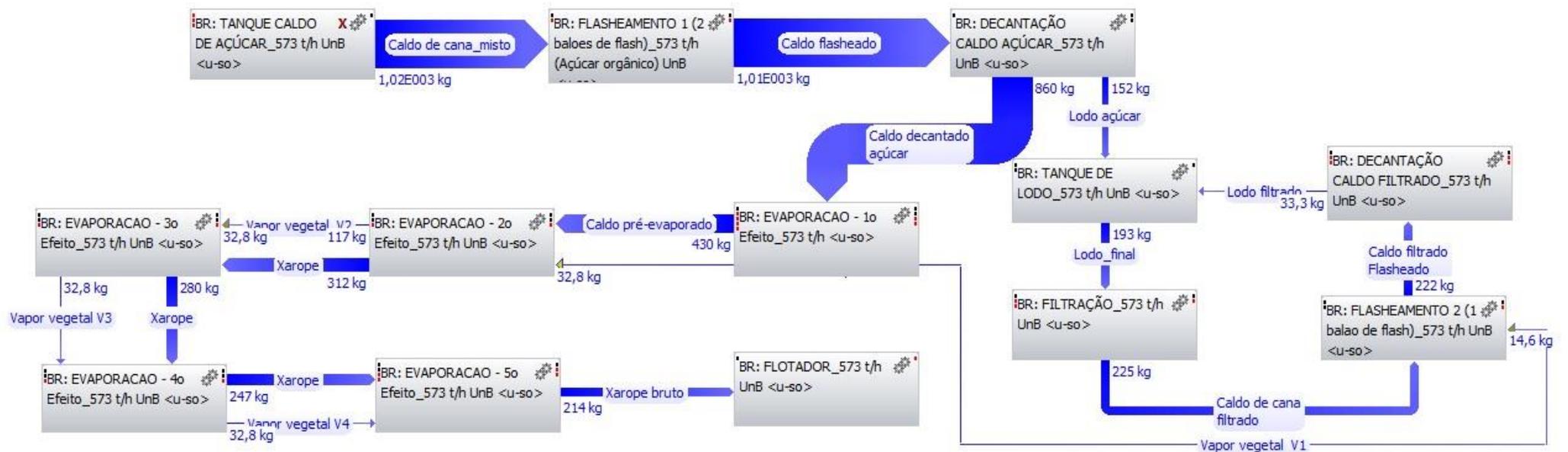
Plano de processo GaBi:Quantidades de referência



## B - FLUXOGRAMA GaBi DA ETAPA DE TRATAMENTO DE CALDO PARA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR ORGÂNICO

### Tratamento do Caldo\_Açúcar Orgânico\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]



## C - FLUXOGRAMA GaBi DA ETAPA DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR ORGÂNICO

### Fábrica de açúcar\_\_Açúcar Orgânico\_573 t/h

Plano de processo GaBi: Mass [kg]

