

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL FERNANDO GARCIA

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DA COLETA DA BIOMASSA
VISANDO A COGERAÇÃO DE ENERGIA E PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA

BAURU - SP

2021

DANIEL FERNANDO GARCIA

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DA COLETA DA BIOMASSA
VISANDO A COGERAÇÃO DE ENERGIA E PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus de Bauru, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica (Sistemas de Energia) – Faculdade de Engenharia de Bauru.

Orientadora: Prof. ^a Dr. Edilaine Martins Soler.

BAURU - SP

2021

G216m Garcia, Daniel Fernando
Modelo de otimização para o planejamento da coleta da biomassa visando a cogeração de energia e produção em uma indústria sucroenergética / Daniel Fernando Garcia. -- Bauru, 2021
84 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientadora: Edilaine Martins Soler

1. Modelos matemáticos. 2. Otimização matemática. 3. Biomassa de cana-de-açúcar. 4. Produção energética. 5. Planejamento da produção. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANIEL FERNANDO GARCIA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 08 dias do mês de setembro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANIEL FERNANDO GARCIA, intitulada **MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E COLETA DA BIOMASSA PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof^ª. Dr^ª. EDILAINE MARTINS SOLER (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof^ª. Dr^ª. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Bioestatística, Biologia Vegetal, Parasitologia e Zoologia / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP, Prof. Dr. ANGELO ALIANO FILHO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO .

Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof^ª. Dr^ª. EDILAINE MARTINS SOLER



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
DANIEL FERNANDO GARCIA

DE: "MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E COLETA DA BIOMASSA
PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA"

PARA:

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DA COLETA DA BIOMASSA VISANDO A
COGERAÇÃO DE ENERGIA E PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

Bauru, 08 de setembro de 2021.

Edilaine M. Soler

Prof^ª. Dr^ª. Edilaine Martins Soler
Orientadora



Faculdade de Engenharia de Bauru – Pós-graduação
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 17033-360 Bauru - SP
tel. (14) 3103-6108 spg.feb@unesp.br www.feb.unesp.br

A todas as pessoas que confiaram em mim no desenvolvimento deste trabalho, a minha família, ao meu namorado, aos meus amigos, a minha orientadora e todas as pessoas que podem se beneficiar com o conteúdo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente a Deus e a minha mãe Maria Aparecida Danjo Garcia que em todos os momentos de desânimo me dava apoio para levantar a cabeça e seguir.

À minha orientadora, professora Edilaine Martins Soler, por toda ajuda, conhecimentos transmitidos e paciência que teve comigo durante esse momento de minha vida.

Ao meu namorado Douglas Pedroso dos Santos que abdicou de momentos de lazer e sociais para poder estar ao meu lado me dando apoio.

A Cícero Pereira Carvalho Junior pelas trocas de experiências e informação em relação à pesquisa que ajudaram a definir algumas decisões tomadas.

À minha sobrinha Isabela Garcia Parras que trilhou esse mesmo caminho da Graduação e Mestrado ao meu lado passando pelas mesmas dificuldades e alegrias.

Aos meus amigos de Pós-Graduação, Amanda Nerger, Ana Raquel Faccioli, João Vitor Dias e Letícia Maria Miquelin, que mostraram o real significado da frase “Ninguém larga a mão de ninguém”.

A todos meus amigos em geral que estiveram ao meu lado me dando apoio, em especial, Anderson Aparecido Pires Cardoso por toda contribuição.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

Se você não gosta do seu destino, não o aceite. Em vez disso, tenha a coragem de mudá-lo do jeito que você quer que ele seja.

Uzumaki, Naruto

RESUMO

As decisões tomadas quanto ao planejamento da produção nas usinas sucroenergéticas são guiadas pelo mercado e/ou por contratos de longo prazo estabelecidos com o setor. O açúcar como um dos principais derivados da cana possui grande impacto nos ganhos da usina por se tratar de um produto comercializado nacional e internacionalmente. O etanol produzido em sua maioria é destinado para uso no mercado de combustíveis. A venda da eletricidade excedente produzida atualmente para incrementar seu lucro está ganhando cada vez mais destaque nas usinas sucroenergéticas. Considerando a coleta e uso da biomassa da cana utilizada para produzir energia, este trabalho propõe um modelo matemático de otimização linear inteira mista para o planejamento da produção e cadeia de suprimentos para cogeração. O modelo visa à maximização dos ganhos de uma usina por meio do balanço econômico da cogeração de energia, produção de etanol e açúcar, por meio da diferença entre as receitas e os custos considerados. Considera-se no modelo a seleção dos talhões para a coleta da biomassa remanescente da colheita mecanizada. Considera-se também a seleção dos talhões onde a cana será colhida e transportada até a usina e as demandas de cada *commodity* e das energias envolvidas na produção sucroenergética, assim como os limites de cada recurso disponível. O modelo proposto foi implementado no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* e testes numéricos foram realizados com uma planta hipotética considerando dois horizontes de planejamento, de 1 e de 7 dias. O *solver* CPLEX mostrou-se eficiente nos testes numéricos realizados e as soluções obtidas demonstram um equilíbrio do *mix* de produção entre açúcar e etanol o que é esperado de uma usina com produção mista.

Palavras-chave: balanço econômico; biomassa remanescente da colheita mecanizada; cadeia de suprimentos; cogeração de energia; otimização linear inteira mista; planejamento da produção.

ABSTRACT

Decisions taken regarding production planning in sugarcane mills are guided by the market and/or long-term contracts established with the sector. Sugar, as one of the main sugarcane derivatives, has a great impact on the mill's earnings as it is a product sold nationally and internationally. Most of the ethanol produced is destined for use in the fuel market. The sale of the surplus electricity currently produced to increase their profit is gaining more and more prominence in sugarcane mills. Considering the collection and use of sugarcane biomass used to produce energy, this work proposes a mathematical model of mixed integer linear optimization for production planning and supply chain for cogeneration. The model aims at maximizing the gains of a plant through the economic balance of energy cogeneration, ethanol and sugar production, through the difference between the revenues and the costs considered. The model considers the selection of plots to collect the remaining biomass from mechanized harvesting. The selection of the plots where the sugarcane will be harvested and transported to the mill is also considered, as well as the demands of each commodity and energy involved in sugarcane production, as well as the limits of each available resource. The proposed model was implemented in IBM ILOG CPLEX Optimization Studio software and numerical tests were performed with a hypothetical plant considering two planning horizons, 1 and 7 days. The CPLEX solver proved to be efficient in the numerical tests performed and the solutions obtained demonstrate a balance of the production mix between sugar and ethanol, which is expected from a plant with mixed production.

Keywords: economic balance; biomass remaining from mechanized harvesting; supply chain; energy cogeneration; mixed integer linear optimization; production planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Principais produtos e subprodutos da cana-de-açúcar	21
Figura 3.2 - Desenho esquemático de uma planta de cana-de-açúcar	22
Figura 3.3 - Sequenciamento das operações de pesagem da cana	28
Figura 3.4 - Fluxograma da composição dos setores de recepção, preparo e extração ..	29
Figura 3.5 - Fluxograma genérico do processo de fabricação de açúcar.....	32
Figura 3.6 - Fluxograma genérico do processo de fabricação do etanol	35
Figura 3.7 - Fluxograma geral do processo de fabricação do açúcar e etanol.....	36
Figura 3.8 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, etanol e eletricidade	38
Figura 5.1 - Comparativo entre as capacidades de moagem e os valores obtidos para o balanço econômico	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Revisão Bibliográfica	18
Tabela 3.1 - Composição média da cana	23
Tabela 3.2 - Constituintes da cana-de-açúcar	23
Tabela 3.3 - Prazos de eliminação da queima da cana-de-açúcar	41
Tabela 5.1 - Parâmetros	62
Tabela 5.2 - Valores adotados para os parâmetros – instâncias de 1 a 7 – horizonte de planejamento de 1 dia	63
Tabela 5.3 - Valores adotados para os parâmetros – instância 8 – horizonte de planejamento de 7 dias	63
Tabela 5.4 - Quantidades produzidas de cada <i>commodity</i> e eletricidade excedente – instância 1	64
Tabela 5.5 - Quantidades produzidas de cada <i>commodity</i> a partir dos recursos - instância 1	65
Tabela 5.6 - Quantidade produzida de cada energia a partir dos recursos - instância 1.	65
Tabela 5.7 - Produção de energia para atendimento das demandas internas - instância 1	65
Tabela 5.8 - Quantidades necessárias dos recursos para produzir cada <i>commodity</i> - instância 1	66
Tabela 5.9 - Quantidades necessárias dos recursos para produzir cada energia - instância 1	66
Tabela 5.10 – Talhões em que deve ocorrer a coleta da BRCM - instância 1.....	66
Tabela 5.11 – Talhões em que deve ocorrer a colheita da cana-de-açúcar– instância 1	67
Tabela 5.12 – Comparativo das soluções obtidas para as instâncias de 1 a 7	68
Tabela 0.1 - Valores praticados nos testes numéricos	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEAC	Álcool Etílico Anidro Carburante
AEHC	Álcool Etílico Hidratado Carburante
AGEITEC	Agência Embrapa de Informações Tecnológicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
BRCM	Biomassa Remanescente da Colheita Mecanizada
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CO ₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Coopersucar	Cooperativa de Produtos de Cana, Açúcar e Energia do Estado de São Paulo Ltda
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
E2G	Etanol de Segunda Geração
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBM	<i>International Business Machines</i>
IEA	Instituto de Economia Agrícola
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
PDB	Portal do Biogás
PIM	Programação Inteira Mista
PPCSC	Planejamento da Produção e Cadeia de Suprimentos para Cogeração
RAM	<i>Randon Access Memory</i>
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SLCS	Sistema de Limpeza de Cana a Seco
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
VHP	<i>Very High Polarization</i>
VVHP	<i>Very High Polarization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3	A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	21
3.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	21
3.2	A CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA.....	22
3.2.1	Ciclo Produtivo da Cana-de-Açúcar.....	23
3.2.2	A Caracterização da Biomassa como Vetor Energético.....	25
3.3	PROCESSO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	27
3.3.1	Recepção da Matéria-Prima.....	27
3.3.2	Preparo da Cana-de-Açúcar.....	29
3.3.3	Moagem da Cana-de-Açúcar.....	30
3.4	PRODUÇÃO DE AÇÚCAR.....	30
3.5	PRODUÇÃO DE ETANOL	33
3.6	PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE	37
3.7	APROVEITAMENTO DA BRCM PARA COGERAÇÃO	39
3.7.1	Sistema para Separação da BRCM.....	40
3.8	CADEIA DE ABASTECIMENTO DA BIOENERGIA	42
4	MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E CADEIA DE SUPRIMENTOS PARA COGERAÇÃO (PPCSC).....	46
4.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	46
4.2	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA PPCSC PROPOSTO.....	47
4.2.1	Nomenclatura.....	47
4.2.2	Função Objetivo.....	51
4.2.3	Restrições de Atendimento às Demandas de <i>Commodities</i>	54
4.2.4	Restrições de Atendimento às Demandas Energéticas.....	54
4.2.5	Restrições de Recursos	55
4.2.6	Restrições de Seleção dos Talhões para Coleta da BRCM	57

4.2.7	Restrições de Seleção dos Talhões para Colheita da cana	58
4.2.8	Restrições de Não-Negatividade	58
4.2.9	Modelo Proposto	59
5	TESTES NUMÉRICOS.....	62
5.1	SOLUÇÕES OBTIDAS PARA AS INSTÂNCIAS COM HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DE 1 DIA.....	64
5.2	SOLUÇÃO OBTIDA PARA A INSTÂNCIA COM HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DE 7 DIAS	69
6	CONCLUSÕES	71
	TRABALHOS PUBLICADOS	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	APÊNDICE A – VALORES ADOTADOS PARA OS PARÂMETROS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Segundo a página Observatório da Cana (2021), o histórico de produção e moagem da cana-de-açúcar no Brasil nas safras de 2018/19 e 2019/20 foi de aproximadamente 621 e de 643 milhões de toneladas, respectivamente. Em relação às mesmas safras, a produção de açúcar foi de aproximadamente 30 milhões de toneladas em ambas as safras e a produção de etanol foi aproximadamente de 34 e 36 mil metros cúbicos. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) diz que a utilização de biomassa desde o ano de 2019 tem uma participação de 8,4% na matriz elétrica brasileira, ocupa a quarta posição ficando atrás da hidráulica, gás natural e eólica.

Segundo Cadavid et al. (2019) o acesso a energias limpas e não poluentes atualmente é definido como uma meta de desenvolvimento sustentável, dentro desse novo contexto, muitos países estão desenvolvendo e promovendo políticas de incentivo para implementação de novos projetos energéticos com a utilização de fontes renováveis, conhecidas também como fontes não convencionais de energia. A alternativa que vem ganhando maior notoriedade como alternativa energética está relacionada ao aproveitamento da biomassa residual deixada pelas cadeias produtivas do agronegócio, como por exemplo a cana-de-açúcar.

Existe uma escolha entre produzir açúcar ou etanol no processo de decisão das usinas. Decidir entre aumentar a produção de açúcar devido à alta produção de cana afeta de forma direta a produção de etanol e vice-versa, pois, ambos os produtos são derivados de uma mesma matéria-prima, ou seja, a cana-de-açúcar. Logo realizar uma análise dos determinantes desta escolha é importante tanto para o setor produtivo quanto para o mercado. É ele que irá definir o *mix* de produção do setor conforme o que diz Lamounier et al. (2006), desta forma se faz necessária uma análise comportamental da produção ao longo da safra para compreender o processo de decisão e sua definição.

Para Carvalho Junior (2016), o diagnóstico do comportamento do setor ao longo das safras em relação à definição do planejamento da produção pelos empresários, se torna de extrema importância para decidir a alocação como forma de otimização das receitas dessas usinas, logo, esses estudos são de grande valia tanto para os empresários, quanto, para o governo.

Ainda segundo o autor, por meio desta prospecção analítica é possível compreender o comportamento do setor produtivo ao longo da safra perante as variações dos preços das *commodities* e mais recentemente da eletricidade excedente. Assim é

possível garantir que não ocorrerá falta desses produtos no mercado, principalmente nos períodos de entressafra, o que possibilita ao governo atuar junto ao setor no momento em que as usinas estão em período produtivo.

Nota-se na literatura que os modelos relacionados ao planejamento da produção e cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar são em sua maioria focados em momentos específicos da produção agroindustrial, ou seja, focados apenas no plantio ou na colheita, ou ainda modelos que abordem apenas a utilização da Biomassa Remanescente da Colheita Mecanizada (BRCM) para a cogeração de energia. Assim, neste trabalho busca-se integrar estes momentos específicos em um modelo único, uma vez que estes estão relacionados entre si, realizando assim uma melhor alocação dos insumos da cana-de-açúcar beneficiando o balanço econômico da usina.

Logo, com o objetivo de obter um modelo integrado para auxiliar no planejamento da colheita e produção de uma usina sucroenergética, assim como, a utilização da BRCM na produção direta das *commodities* açúcar *Very High Polarization* (VHP), etanol anidro e etanol hidratado, oriundas da cana-de-açúcar, este trabalho propõe um modelo matemático de otimização para o planejamento da coleta da biomassa, visando a cogeração de energia e produção em uma indústria sucroenergética.

O modelo proposto foi implementado no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* e testes numéricos foram realizados com uma planta hipotética considerando dois horizontes de planejamento, de 1 e de 7 dias. O *solver* CPLEX mostrou-se eficiente nos testes numéricos realizados e as soluções obtidas demonstram um equilíbrio do *mix* de produção entre açúcar e etanol o que é esperado de uma usina com produção mista.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica. O capítulo 3 descreve a cultura do cultivo da cana-de-açúcar, seus principais produtos e a utilização da BRCM na produção energética. O capítulo 4 descreve o modelo matemático proposto. No capítulo 5, são descritos os testes numéricos, as análises e discussões das soluções obtidas pela implementação do modelo e no capítulo 6, as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos trabalhos que abordam modelos matemáticos para otimização das operações de plantio, colheita e geração de energia da cana-de-açúcar. Em destaque, modelos aplicados em plantas agroindustriais integradas com o processo de cogeração de energia.

Existem na literatura trabalhos com enfoques mais específicos, como os trabalhos apresentados por Carpio e Souza (2017), Souza (2018), Costa et al. (2016) e Ba et al. (2016) que apresentam modelos matemáticos para alocação da cana-de-açúcar na produção industrial. Há Modelos aplicados ao planejamento do plantio e/ou colheita da cana como abordado por Iannoni e Morabito (2006), Spadotto e Florentino (2006), Isler et al. (2014), Silva et al. (2012) e Junqueira e Morabito (2018) e também modelos que abordam a viabilização da utilização da biomassa na cogeração de energia como Tolentino (2007) e Rocha (2011).

Uma evidência de tantos estudos é o fato de a cana-de-açúcar ser uma das culturas mais abundantes utilizada na produção de insumos de primeira necessidade pelo mundo, como o açúcar e o etanol, além de que, sua manufatura está envolvida na cogeração de energia elétrica. Logo, estudos que visam melhorar o planejamento da produção por meio da melhor alocação dos insumos da cana-de-açúcar no processo industrial, e também o desenvolvimento de modelos que buscam um melhor aproveitamento da BRCM para gerar um aumento da cogeração nas usinas sucroenergéticas estão sendo desenvolvidos cada vez mais.

A Tabela 2.1 apresenta trabalhos existentes na literatura assim como as descrições dos mesmos.

Tabela 2.1 - Revisão Bibliográfica

Autor (ano)	Descrição da pesquisa
Silva (2011)	Propõe um modelo matemático para determinar quais variedades de cana devem ser plantadas nos talhões disponíveis a fim de alcançar o menor custo possível referente ao processo de colheita e transporte da cana. Foi utilizado um Algoritmo Genético para resolução do modelo proposto.
Yue et al. (2014) e Hernández et al (2017)	Apontam as principais oportunidades e desafios na modelagem e otimização das cadeias de abastecimento da biomassa direcionada à produção da bioenergia.

Continuação da Tabela 2.1 – Revisão Bibliográfica

Autor (ano)	Descrição da pesquisa
Khatiwada et al. (2016)	Apresentam uma análise tecno-econômica das biorrefinarias brasileiras de cana. Têm como foco a utilização do bagaço excedente e da palha para produção de etanol e/ou eletricidade. Este estudo investiga o trade off no uso da biomassa de cana-de-açúcar para produzir energia (bioeletricidade versus E2G).
Carvalho Junior (2016)	O modelo matemático proposto pelo autor consiste na reprodução da operação industrial sucroenergética, cuja a manufatura de bens, a partir de um mesmo recurso, dá-se de forma simultânea. O objetivo do modelo é maximizar o lucro recorrente da empresa.
De Lima et al. (2017)	Propõem em seu trabalho uma abordagem híbrida para a solução do modelo multiobjetivo relacionado à minimização dos custos de coleta de resíduos da cana e/ou maximização da energia produzida por esses resíduos, com o auxílio de estratégias de resolução de problemas multiobjetivos. O modelo apresentado pelos autores consiste em identificar as variedades de cana-de-açúcar com menor custo de coleta de resíduos, ao mesmo tempo em que visa obter a maior quantidade de energia produzida por esses resíduos. Os resultados confirmam que o método híbrido proposto para solução do modelo apresentou bom desempenho computacional e soluções confiáveis.
Leda et al. (2019)	Apresentam uma pesquisa em que objetivam modelar as correlações de produtividade da cana por meio de índices de vegetação colhidos por meio de análises de imagens orbitais e com isso elaboraram modelos matemáticos que expliquem essa produtividade por meio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.
Cervi et al. (2019)	Avaliam o potencial energético da palha oriunda da cana-de-açúcar ecologicamente disponível no estado de SP, levando em conta a distribuição dos canaviais, a variação da produtividade da cana, a localização e os dados de moagem de cada moinho.

Continuação da Tabela 2.1 – Revisão Bibliográfica

Autor (ano)	Descrição da pesquisa
Carvajal et al (2019)	Propõem um modelo que estabelece um conjunto de decisões agrícolas que maximizam a produtividade da cana, de forma a otimizar o valor presente líquido dos lucros esperados. O modelo proposto é utilizado para avaliar a viabilidade de uma nova planta de produção de biocombustíveis.
Cadavid et al. (2019)	Propõem um modelo de Programação Inteira Mista (PIM) para seleção dos talhões para coleta da BRCM para a produção de energia em um determinado dia.
Tolentino (2021)	Propõe três modelos multiobjetivos para o planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia com a finalidade de otimizar a produção de fibra e sacarose dessas duas culturas na produção de açúcar, etanol e bioeletricidade.
Poltronieri (2021)	Propõe um modelo de otimização linear inteira mista para o planejamento plantio e colheita da cana-de-açúcar e cana-energia para uma usina sucroenergética, que visa maximizar a produção da sacarose e da fibra nos canaviais.

Fonte: Autor (2021)

No próximo capítulo é descrito a cultura do cultivo da cana-de-açúcar, a utilização da biomassa de cana e processo industrial da cana-de-açúcar na produção de açúcar, etanol e eletricidade.

3 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Este capítulo apresenta uma descrição geral referente a cultura da cana-de-açúcar e a produção de seus subprodutos.

3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR

A página AgroPós (2021) apresenta as principais características da cana-de-açúcar, que são: é considerada uma cultura semi-perene (5 anos ou mais), pertence à família das *Poaceae*, a mesma família à qual pertence o milho, possui abundantes perfilhamentos, produz cerca de 4 a 12 colmos, alcança uma altura entre 3 a 5 metros, apresenta um sistema radicular fasciculado e relativamente grande, sua eficiência fotossintética (C4) é alta, oferece uma grande produção da BRCM, oferece um alto controle da erosão do solo e possui grande valor econômico baseado no teor do açúcar e da BRCM.

Ainda segundo a página, são dois os produtos essenciais para a economia mundial oriundos da cana-de-açúcar: o açúcar que compõe parte indispensável da alimentação humana e o álcool, utilizado como combustível para veículos (etanol) ou utilizado em bebidas de teor alcoólico como a cachaça. A Figura 3.1 descreve alguns produtos e subprodutos derivados da cana-de-açúcar.

Figura 3.1 - Principais produtos e subprodutos da cana-de-açúcar

Fertilizante	Utilização direta	C a n a - d e - a ç ú c a r	Calor e vapor
Alimento animal			Eletricidade
Rum			Briquetes
Álcool etílico			Metano e gás
Destilados	Destilaria		Polpa celulósica e papel
Álcool anidro			Papelão
Derivados do álcool			Aglomerados
Vinagre			Alfa celulose
Ácido acético			Xiliton
Acetona - butanol			Plásticos
Ácido cítrico	Indústria de fermentação	M e l a ç o	Cama de frango
Ácido láctico			Alimento de animal
Glicerol			Concreto de bagaço
Fermento			Compostos
Ácido aconílico			Substratos para cogumelo
Glutamato monossódico			Fertilizante
Dextrana	Miscelânea		Alimento animal
L-lisina			Cera
Goma xantana			Gordura
Ácido itacônico			
	Palmito e folhas	A ç ú c a r e Á l c o o l	Açúcar e Álcool
	Proteína do caldo		Cinzas
			Gases de combustão

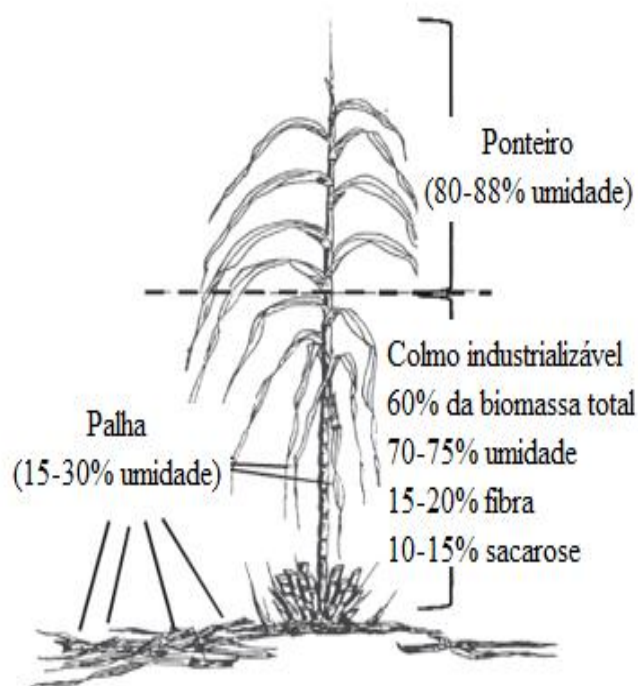
Fonte: Matsuoka et al. (2012)

Pode-se observar que da cana-de-açúcar tudo pode ser aproveitado, pois seus subprodutos e resíduos podem ser utilizados desde a alimentação animal à humana, na fertilização de solos e até na geração de energia. A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021a) diz que o Brasil é um dos maiores produtores de cana do mundo. A Companhia apresenta dados apontando que na safra de 2020/21 a produção foi de aproximadamente 655 milhões de tonelada, mostrando assim que para o Brasil cultivar cana para fins energéticos o faz ocupar uma posição privilegiada no cenário nacional.

3.2 A CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA.

A cana-de-açúcar utilizada como matéria-prima na produção de açúcar, etanol e eletricidade, é constituída segundo Tolmasquim (2004) por: 81,2% de colmo onde se encontram os açúcares, 6,1% palmito, 5,6% folhas verdes e 7,1% folhas secas. A Figura 3.2 apresenta um esquema detalhado de uma planta de cana-de-açúcar.

Figura 3.2 - Desenho esquemático de uma planta de cana-de-açúcar



Fonte: Matsuoka et al. (2012)

Segundo Tolmasquim (2004), do total da energia contida nas estruturas da cana, um terço está no caldo, aproximadamente, e o restante se divide em partes iguais entre a BRCM e o bagaço, logo, esses subprodutos se tornam fontes ricas em açúcares. Pesquisas estão sendo

desenvolvidas nos últimos anos para que ocorra o aproveitamento total destas fontes de recursos renováveis, como por exemplo, a obtenção de etanol celulósico. O amadurecimento dessa tecnologia permitirá o uso integral da cana entre outros benefícios, e dessa forma, aumentará significativamente a produção das principais *commodities* resultantes desta cultura sem que, para isso, seja necessário expandir as áreas de cultivo da cana.

Observamos nas Tabelas 3.1 e 3.2 que a composição química da cana é bastante variável em relação aos seus elementos constituintes. Porém semelhanças podem ser encontradas em todas as variedades em relação a termos qualitativos e quantitativos. São consideradas fibras todo o material insolúvel em água e já o conjunto de todos sólidos solúveis é denominado de caldo (BASSETTO, 2006).

Tabela 3.1 - Composição média da cana	
Componente	Teor (%)
Água	65 – 75
Açúcares	11 – 18
Fibras	8 – 14
Sólidos Solúveis	12 – 23

Fonte: Lamonica (2007)

Tabela 3.2 - Constituintes da cana-de-açúcar	
Constituintes	Sólidos Solúveis (%)
Açúcares	73 – 93
Amido	0,01 – 0,05
Canas	0,3 – 0,6
Ceras e graxas	0,05 – 0,15
Corantes	3 – 5
Proteínas	0,5 – 0,6
Sais	3 – 5

Fonte: Lamonica (2007)

Seabra (2008) afirma que a sacarose oriunda da cana-de-açúcar é a matéria-prima tanto do açúcar quanto do etanol e o que determina a qualidade das variedades da cultura da cana é o seu teor. Em contrapartida o componente considerado como uma das grandes razões para a competitividade dos produtos da cana é a fibra, pois, graças ao seu uso como componente energético garantiu as usinas autossuficiência energética, possibilitando também a venda de excedentes energéticos.

3.2.1 Ciclo Produtivo da Cana-de-Açúcar

Segundo COOPERCITRUS (2021) atualmente a área que a cana-de-açúcar ocupa pelo mundo é de, aproximadamente, 25 milhões de hectares e uma produtividade total de 1,56 bilhões de toneladas. O Brasil ocupa a primeira posição no *ranking* com, aproximadamente 9,6 milhões de hectares plantados e uma produtividade média de 70 ton/há. Ainda segundo o portal Nova Cana (2021) tendo uma produtividade média de 71 kg de açúcar e 42 litros de etanol para cada tonelada de cana processada.

Silva (2011) diz que a produtividade da cana é determinada por diversos fatores, tais como: a variedade, o solo, o clima, as práticas culturais (controle de erosão, plantio, descompactação, erradicação de ervas daninhas, controle de pragas e doenças) e a colheita, envolvendo nesta última as etapas de limpeza, corte e carregamento da cana.

O autor ainda afirma que os fatores de produção, sempre que possível, precisam ser manejados de forma adequada e com um gerenciamento direto do produtor, tal fato é imprescindível para que ocorra uma alta produtividade com o intuito de minimizar os custos, pois este é o objetivo de qualquer exploração comercial.

Para deixar as áreas de cultivo aptas para receber a cultura da cana é necessário realizar operações de preparo do solo e devido aos avanços genéticos realizados por empresas especializadas nesta área, a indústria vem notando uma adaptação melhor da cana em diferentes solos, desta forma haverá uma variedade de cana mais adequada para o plantio em cada tipo de solo específico (CARDOSO, 2006).

Em relação ao plantio, Segato et al. (2006) diz que existem dois tipos, o mecanizado e o manual. O plantio ocorre em diferentes períodos que dependem da localização geográfica, podendo ser plantio de verão que ocorre nos meses de janeiro a março, plantio de outono que ocorre nos meses de abril a maio e também, com o auxílio de irrigação, pode-se realizar o plantio de inverno abrangendo os meses de junho a agosto.

Segundo Go e Conag (2019) os talhões de cana-de-açúcar são plantados de forma escalonada. A plantação leva em média 13 meses para crescer até a maturidade. As usinas açucareiras costumam montar uma programação diária da colheita dos talhões de forma a maximizar a quantidade de açúcar que pretendem produzir. Para a construção desse cronograma os seguintes fatores devem ser considerados: distância do terreno à usina, conteúdo de sacarose na colheita, disponibilidade de veículos, equipamentos de colheita e equipes e tempo de espera na usina pela matéria-prima (o teor de açúcar na cana começa a diminuir no momento do corte, processo conhecido como inversão).

Para os sistemas de colheita, Ripoli e Ripoli (2004) dizem que existem três tipos: manual, mecanizado e semimecanizado. No sistema manual, faz-se necessário o uso da mão-de-obra humana para realizar o corte e carregamento da matéria-prima, nesse sistema a presença de queimadas ocorre com a finalidade de fornecer maior segurança aos trabalhadores, pois ela ajuda na eliminação de folhas, insetos e animais peçonhentos, no entanto este sistema foi abolido em 2014.

Ainda segundo os autores, no sistema mecanizado a colheita é feita ainda com a cana crua, ela é picada pelas máquinas que realizam a separação do colmo da parte aérea e o colmo

é depositado nos caminhões e a parte aérea é ventilada para fora do veículo caindo e permanecendo sobre o solo. A colheita mecanizada se torna um meio viável, pois, ele ocorre sem queimadas, desta forma reduzindo o impacto ambiental, porém, eleva os custos.

Para finalizar no sistema semimecanizado segundo os autores apenas o corte é realizado de forma manual, já o carregamento é mecânico, sistema útil quando a colheita é realizada em áreas de alta declividade, pois, não permite a atividade de máquinas colheitadeiras. Neste sistema as queimadas ainda se fazem presentes.

O transporte da cana após a colheita, do campo até a processadora é realizada por caminhões, o custo deste transporte segundo Marques (2009) é uma grande parcela que compõe os custos de produção. A logística e o raio médio do transporte possuem grande impacto nestes custos e, em alguns casos, podem inviabilizar o processo produtivo.

Silva (2011) diz que a caracterização da cana como matéria-prima é definida por uma série de especificidades que são intrínsecas à própria cultura, podendo ser alteradas pelos manejos agrícolas e industriais que definem diretamente o potencial da cana na produção de açúcar e etanol. Ripoli & Ripoli (2004) destacam que dentre os principais indicadores em relação a qualidade da cana e seu impacto industrial estão: o teor de sacarose dos colmos, conhecido como POL e a porcentagem de fibra da cana-de-açúcar, determinar esses indicadores é de extrema importância na avaliação da qualidade da cana para sua compra e venda.

É por meio da sacarose contida na planta que a qualidade da cana é medida em São Paulo e no Centro-Sul do Brasil, quanto maior for o teor de sacarose, melhor será para as usinas nas produções de açúcar e etanol. O valor do POL recomendado para a cana deve ser superior que 14%. Já a fibra da cana interfere na eficiência de extração da moenda, porque se por um lado quanto mais alto for o percentual de fibras, menor será a eficiência de extração, por outros baixos teores de fibra ocasionam danos mecânicos nos processos de corte e transporte, favorecendo a contaminação da cana e perdas para a usina, em principal a perda de açúcar na água de lavagem. O teor de fibra recomendado para a cana está entre 11% a 15% (SILVA, 2011).

3.2.2 A Caracterização da Biomassa como Vetor Energético

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), a biomassa pode ser definida como todo recurso renovável, desde que sua procedência seja de matéria orgânica, podendo ser tanto de origem animal quanto vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. Uma de suas principais vantagens é que a biomassa, embora possua sua eficácia

reduzida, o seu aproveitamento ocorre diretamente por meio das combustões que acontecem em caldeiras e fornos. Nos dias atuais, a utilização da biomassa na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento da eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica, está se tornando cada vez mais importante.

A biomassa pode ser classificada segundo a página VEIC (2021) em três tipos principais: biomassa de primeira geração que inclui as culturas comestíveis como cana-de-açúcar e milho; biomassa de segunda geração que inclui resíduos orgânicos, madeira, resíduos alimentares e resíduos de culturas de biomassa específica e biomassa de terceira geração que tem como base principal as algas.

A busca de fontes alternativas mais eficientes e limpas com menor impacto sobre a natureza, tornou-se uma prioridade mundial conforme afirma Macedo (2001), justificando que as fontes comumente chamadas de renováveis ganharam notório destaque em sua crescente utilização como insumo na produção energética.

A biomassa sendo uma fonte de energia primária é vista como uma das principais responsáveis pela produção da energia consumida nos países em desenvolvimento já que, como uma fonte de energia renovável, possui uma escala de produção energética suficiente para que desempenhe um papel significativo em programas de energias renováveis e na criação de uma sociedade mais consciente ecologicamente falando (DANTAS, 2010).

Para Cortez et al. (2008), é nos resíduos da biomassa que encontramos a principal fonte de geração de energia, visto que detritos que são gerados pelo mundo são recursos de grandes potencialidades na obtenção de energia desde que estejam sob uma exploração adequada. Cada tipo de resíduo, seja ele vegetal, animal, industrial ou florestal, necessita de tecnologias diferentes para seus respectivos processamentos. Faz-se necessária uma avaliação do custo e da eficácia energética ao longo de suas cadeias produtivas. Foram inúmeras as tentativas dispostas a estimarem a produção e o uso dos resíduos, porém, variações sempre eram notadas graças à existência dos mais diversificados usos dos resíduos e pela necessidade de determinar o que é ou não é resíduo que possa ser utilizado na produção energética.

Para finalizar, os autores ainda comentam que é na zona intertropical onde as principais regiões produtoras de energia a partir da biomassa se localizam, dando destaque aos países que formam a América Latina, Caribe e Ásia. No Brasil, a biomassa mais utilizada na produção energética advém da cana-de-açúcar e as indústrias sucroenergéticas brasileiras possuem um avançado nível de maturidade tecnológica. Podemos dizer que a experiência brasileira é importante no que se refere ao porte da atividade canavieira, entretanto não à eficiência com que a biomassa é aproveitada.

3.3 PROCESSO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo Carvalho (2009), os principais produtos da agroindústria canavieira no Brasil são: o açúcar, destinado ao mercado de alimentos, o Álcool Etílico Anidro Carburante (AEAC), utilizado como combustível adicionado à gasolina e o Álcool Etílico Hidratado Carburante (AEHC), destinado ao abastecimento de veículos movidos exclusivamente a etanol ou modelos flex.

Ainda segundo o autor, a BRCM e o bagaço estão se popularizando devido à capacidade que ambos apresentam no mercado de cogeração dentro do país. Tal tipo de indústria vem crescendo notoriamente nas últimas décadas, apresentando atualmente flexibilidade e capacidade de produzir variadas quantidades dos principais derivados da cana-de-açúcar e com isso foram obtidos ganhos sinérgicos em relação à produção conjunta de etanol e açúcar.

Como o processamento industrial da cana-de-açúcar nas usinas e destilarias envolve vários momentos distintos, a fim de facilitar o entendimento, o beneficiamento da cana está dividido por tópicos, passando desde a recepção da matéria-prima até a produção de energia.

3.3.1 Recepção da Matéria-Prima

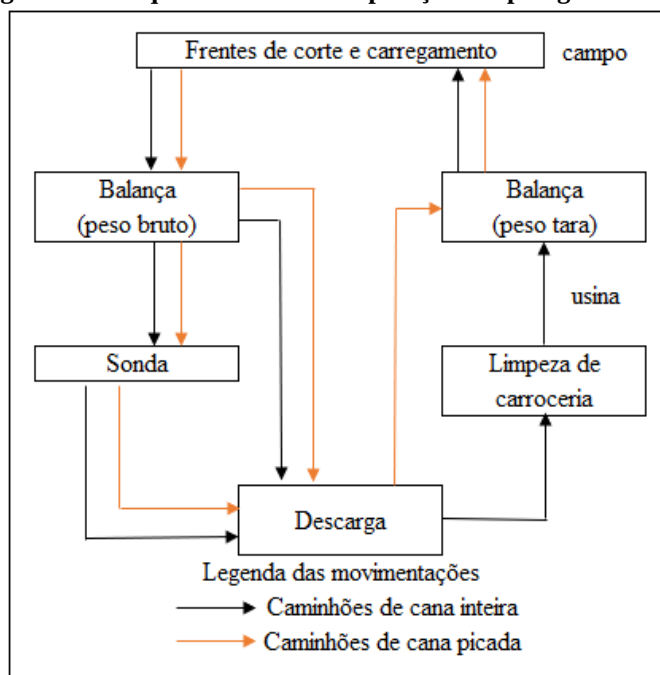
A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) de Informações Tecnológicas (AGEITEC, 2021a) diz que, no Brasil, o transporte da cana-de-açúcar é de predominância rodoviário, feito por caminhões com reboque do tipo “Romeu e Julieta”, treminhões e rodotrens.

No estado de São Paulo, especificadamente, temos um corte 90% mecânico da colheita, tal processo acontece por conta de restrições ambientais, como exemplo a Lei Estadual 11.241 de 19 de setembro de 2002 que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da BRCM da cana-de-açúcar e dá providências correlatas (GOVERNO, 2021).

Moraes e Shikida (2002) dizem que as carretas que transportam a cana colhida no campo passam por pesagens em balanças eletrônicas para que suas cargas sejam pesadas antes mesmo de chegarem às usinas. Algumas dessas carretas são separadas e seus conteúdos passam a ser amostras e, futuramente, em laboratórios serão determinados, o teor de sacarose da cana.

A Figura 3.3 ilustra o sequenciamento de como acontece a etapa de pesagem.

Figura 3.3 - Sequenciamento das operações de pesagem da cana



Fonte: Silva et al (2011)

Por meio dessa avaliação laboratorial é possível fazer o controle agrícola, a remuneração do transporte, o controle da moagem, o cálculo do rendimento industrial e a determinação dos valores para o pagamento da cana (MORAES e SHIKIDA, 2002). A escolha de quais caminhões vão transportar a cana e que deverão ser selecionados como amostra acontece por meio de sorteio, porém todos os caminhões de todos os fornecedores contribuíram com amostras (CORTEZ, 2010).

Ao chegar à usina a cana pode ter dois destinos, armazenada temporariamente devido a sua perecibilidade, ou levada diretamente para as moendas para ser processada. A matéria-prima estocada nos pátios das usinas são submetidas às mesas de alimentação, posicionadas com uma angulação que varia de 5° até 45° e assim produzem colchoes de cana homogêneos e contínuos para facilitar as operações subsequentes do processo (CARVALHO JUNIOR, 2016).

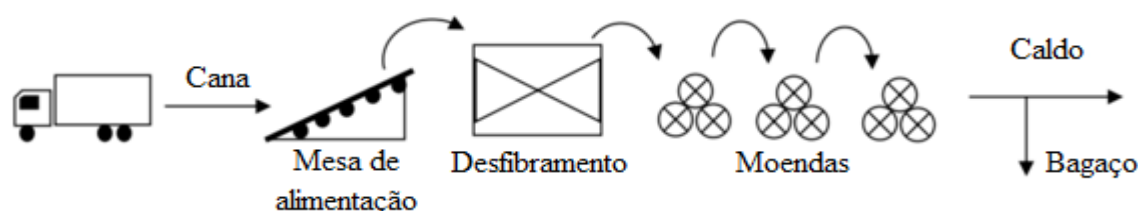
Ainda segundo o autor, com o aumento das colheitas feitas por meios mecânicos, essas mesas alimentadoras precisaram sofrer uma série de adaptações para permitir agora o recebimento da cana-de-açúcar picada e não mais os talhões inteiros. Modificações realizadas para aumentar a eficiência no processo de exclusão das impurezas minerais são de extrema importância, pois a cana picada diferente da cana inteira não pode ser lavada, porque, caso isso ocorra, perdas inaceitáveis de açúcares ocorrerão.

3.3.2 Preparo da Cana-de-Açúcar

A preparação da cana-de-açúcar tem por objetivo causar a desintegração parcial do colmo, aumentando a exposição das células da cana a fim de facilitar o processo de extração da sacarose (WALTER, 1994). Segundo Calle (2000), esse preparo da matéria-prima é realizado para que a densidade da cana seja aumentada e, como consequência disso, sua capacidade de ser moída, pois ao forçar a abertura das células, além de ser possível ampliar o rendimento de extração, ajuda na liberação do caldo.

Costa (2017) diz que a composição do setor de preparo da cana é composta juntamente com os setores de recepção e extração do caldo, por equipamentos dispostos de forma sequencial, integrados e otimizados em conjunto. A Figura 3.4 mostra um esquema simplificado dessa composição dos três setores.

Figura 3.4 - Fluxograma da composição dos setores de recepção, preparo e extração



Fonte: Costa (2017).

O autor ainda diz que o alinhamento desta composição foi padronizado em 1974, por meio da contratação da consultoria de Deon Huller pela Cooperativa de Produtos de Cana, Açúcar e Energia do Estado de São Paulo Ltda (Coopersucar) com o intuito de desenvolver novas tecnologias que fossem mais eficazes e adaptadas a realidade do Brasil.

O mesmo ainda explica que as moendas foram escolhidas como o sistema adequado para realizar a extração do caldo por conta de seu domínio já existente nas instalações canavieiras. Logo, o sistema de preparação foi então padronizado com um picador e um desfibrador, ambos montados sobre a esteira metálica, entre a mesa alimentadora e a moenda conforme pode ser observado na Figura 3.11. Caso haja necessidade de moagens mais agressivas, o recomendado é que se instale mais um picador na frente do conjunto, atuando como nivelador do colchão de cana.

Para finalizar Rodrigues (2005), diz que tanto o sistema de preparo quanto o sistema de extração consomem vapor para o acionamento das turbinas, que fornecem energia mecânica aos desfibriladores, ternos das moendas e picadores. Afirma também que, graças à eletrificação

destes equipamentos, é possível a substituição dos turbogeradores por motores elétricos, permitindo um aumento significativo na eficiência de conversão energética e como resultado temos um aumento na produção de eletricidade excedente.

3.3.3 Moagem da Cana-de-Açúcar

A composição da cana-de-açúcar é, essencialmente, caldo e fibra e, pelo fato de que a sacarose está dissolvida no caldo, o processo de moagem tem como principal objetivo a extração da maior quantidade possível de açúcar. No processo industrial, são dois os processos básicos de extração: a difusão e a moagem (CALLE, 2000).

O autor explica que, nas moendas, a cana-de-açúcar é prensada entre rolos que recebem uma determinada pressão e dessa forma o caldo do interior das células da cana é extraído. Pelo fato de a cana passar por inúmeras compressões, obtemos ao final dessa operação de moagem, caldo misto e bagaço. Enquanto o caldo segue para os processos de tratamento, o bagaço segue para as caldeiras, onde, será queimado para gerar vapor.

Calle (2000) explica que para uma maior extração da sacarose, ocorre um processo chamado embebição, composta pela adição de água ao bagaço com a finalidade de aumentar a diluição do caldo que ainda resta no bagaço. A operação de moagem é considerada um processo estritamente volumétrico e, até a etapa de moagem, o processamento industrial da cana nas usinas é comum tanto para produção de etanol quanto para produção de açúcar.

Para finalizar esse processo, o autor diz que a solução de caldo misto obtido na moagem, antes de ser separada, recebe tratamento primário, ou seja, passa por peneiras para assim eliminar as possíveis impurezas que ali estejam contidas, buscando adequar a matéria-prima para as etapas subsequentes do processo.

3.4 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR

Após o tratamento primário, o caldo obtido das moendas tem sua massa quantificada e passa por dois tratamentos químicos: sulfitação e calagem. Araújo (2017) e Paulino (2009) explicam que a adição de sulfito ao caldo tem como principais objetivos: baixar o Potencial Hidrogênico, inibir reações que causam formação de cor, coagular os colóides solúveis, precipitar o sulfito de cálcio e diminuir a viscosidade. Por meio desse procedimento específico, as operações posteriores de evaporação e cristalização são facilitadas. A neutralização do caldo pela adição de cal, segundo os autores, tem como principais objetivos: eliminar corantes,

neutralizar ácidos orgânicos e a formação de fosfito e fosfato de cálcio.

Tais produtos químicos adicionados são de extrema importância pois, ao sedimentarem, agregam a si as impurezas presentes no caldo. Esses agentes químicos, ao receberem altas temperaturas, causam a formação de precipitados que auxiliam na remoção das impurezas e o mais importante, sem afetar o teor de sacarose. O que pode ser notado é que a definição do processo de purificação depende praticamente de qual tipo de açúcar que será fabricado (ARAÚJO, 2017 e PAULINO, 2009).

O caldo, após receber o tratamento químico, é aquecido a uma temperatura aproximada de 105 °C com a finalidade de acelerar a coagulação e floculação dos colóides de proteína não açucarados e emulsificar as gorduras, ceras e resinas, além de realizar a remoção dos gases (CALLE, 2000).

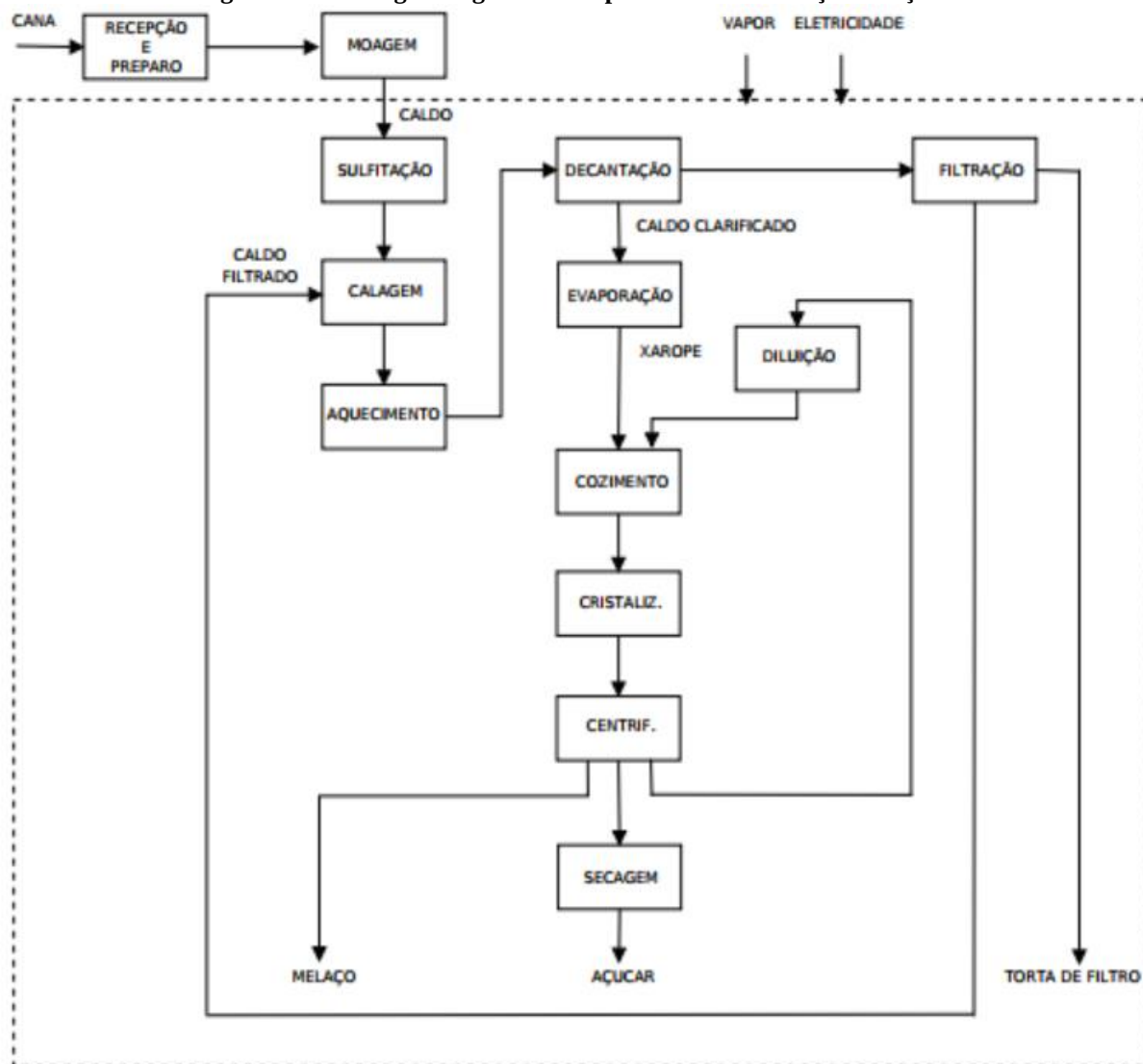
O autor diz que o próximo passo no processo acontece no decantador em que ocorre a sedimentação das impurezas, em seguida segue para os filtros de vácuo e é desta etapa que resulta o caldo filtrado e a chamada torta residual que é um composto orgânico rico em cálcio, nitrogênio e fósforo cujo destino é um complemento na adubação das áreas de plantio. O caldo filtrado e clarificado segue para os evaporadores contínuos, processo no qual ocorre a concentração do caldo, e quando o mesmo atingir 65 °Bx passa a receber o nome de xarope.

Calle (2000) diz que após os evaporadores, o xarope vai para outro processo de cozimento, nesse novo processo ocorre a formação de cristais, resultantes da precipitação da sacarose dissolvida na água. Essa massa cozida formada pelo xarope concentrado a 90 °Bx segue caminho para os cristalizadores, a finalidade aqui é recuperar parte da sacarose ainda contida no mel e só depois é descarregada nas centrifugas.

Dentro das centrífugas esse melaço é segregado dos cristais de sacarose e o processo termina com a lavagem dos mesmos em água ou vapor. Para a recuperação do açúcar dissolvido, o melaço é coletado em tanques e o material que sobra deste processo é conhecido como melaço final, sendo destinado à produção do etanol. Todo o açúcar descarregado das centrífugas é levado para o processo de secagem e finalmente ensacado, pesado e armazenado (CALLE, 2000).

A Figura 3.5 apresenta o diagrama com o fluxo genérico do processo de fabricação da *commodity* açúcar ilustrando os processos citados anteriormente.

Figura 3.5 - Fluxograma genérico do processo de fabricação de açúcar



Fonte: Seabra (2008)

Segundo Alpha Brasil (2021), o açúcar pode ser refinado ou não de acordo com o grau de pureza da matéria-prima, os açúcares mais escuros como o VHP e o *Very Very High Polarization* (VVHP) são conhecidos como açúcares de alta e altíssima polarização respectivamente, considerados mais puros em relação aos outros açúcares e possuem baixa umidade, em torno de 0,10%, dessa forma são considerados os açúcares ideais para exportação. O açúcar VVHP quando comparado com o VHP tem sua coloração mais baixa, granulometria fina e apresenta uma polarização muito elevada, fato que facilita a sua filtrabilidade.

Já os açúcares refinados, também conhecidos nos centros industriais como Icumsa 45, possuem fácil dissolução e são mais comuns nos supermercados para venda, sua granulometria é considerada extrafina e possuem coloração branca que os fazem ser amplamente utilizados. No processo de refinamento do açúcar são adicionados aditivos químicos como o enxofre, para

fazer com que se acentuem as características já citadas e se torne saboroso, porém, como consequência disso, ocorre a remoção de vitaminas e sais minerais, deixando apenas as chamadas calorias vazias, ou seja, sem nutrientes (ALPHA BRASIL, 2021).

3.5 PRODUÇÃO DE ETANOL

Cortez (2010) diz que com a expansão na produção do etanol nas duas primeiras fases do Proetanol entre os anos de 1975 a 1985, o etanol ganhou uma extrema importância econômica e estratégica para o setor sucroenergético do Brasil. No início do programa, o etanol representava 10% da cana processada aproximadamente, porém, no final desses dois períodos de crescimento esse percentual chegou a 70%.

Para o autor a produção de etanol brasileira é predominante baseada na fermentação, tanto do caldo da cana-de-açúcar quanto de misturas de caldo e melaço, graças a isso ocorre uma vasta sinergia na produção de açúcar e etanol nas usinas brasileiras. O processo de transformação bioquímica de açúcares em etanol, gás carbônico e calor sob ações enzimáticas é chamado de fermentação alcoólica.

As primeiras etapas do processo de fabricação do etanol, da recepção da cana-de-açúcar ao tratamento inicial do caldo da cana, são praticamente os mesmos da fabricação do açúcar. A diferença passa a ocorrer quando o caldo passa por um tratamento mais completo como purificação, pasteurização, adição de cal, aquecimento e decantação. O caldo agora livre de impurezas e esterilizado é misturado com o melaço, formando o mosto, a partir deste momento está pronto para ser encaminhado para a destilaria (CORTEZ, 2010).

Segundo Seabra (2008), o mosto segue caminho pelas dornas de fermentação, onde são adicionadas leveduras (*Saccharomyces Cerevisae*) e passa pelo processo de fermentação por um período de 6 a 12 horas. No Brasil, o processo de fermentação mais conhecido e utilizado é o Melle-Boinot e sua característica principal é a recuperação dessas leveduras, por meio da centrifugação do mosto fermentado, também conhecido como vinho.

O autor ainda diz que após a fermentação do vinho que já se encontra com uma concentração alcoólica de 7% a 10% há centrifugação e acontece a recuperação das leveduras para, posteriormente, ser enviado para as colunas de destilação. A recuperação do etanol presente no vinho se dá por meio da destilação, processo que ocorre com a utilização de diferentes pontos de ebulição das diferentes substâncias voláteis presentes no vinho e as separa por meio de aquecimento.

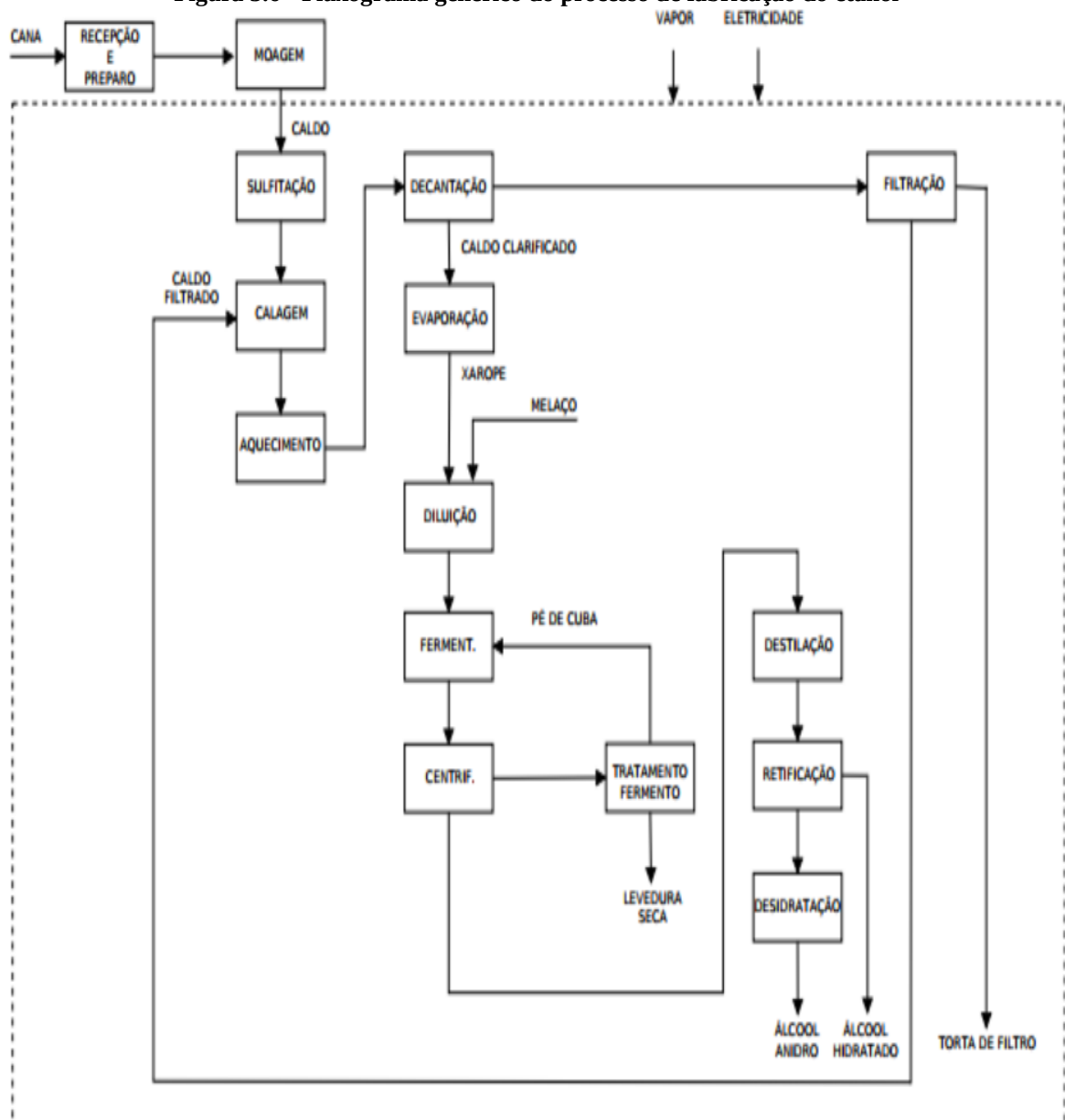
Esta operação segundo Seabra (2008) acontece com o auxílio de sete colunas de destilação separadas em quatro estágios, sendo eles: destilação, retificação, desidratação e recuperação do ciclo-hexano. O Portal Do Biogás (PDB, 2021) diz que na primeira etapa, o etanol é separado do vinho com a flegma, que são vapores de 40 a 50 °GL, após isso o etanol é enviado para retificação. Os voláteis dão origem ao etanol de segunda qualidade e a vinhaça, composta pelas demais substâncias existentes. A vinhaça também chamada de vinhoto, possui índice de produção treze vezes maior que o do etanol, aproximadamente, resultando então em uma produção proporcional de 13 litros deste subproduto para cada litro de etanol produzido. Além disso também apresenta Demanda Bioquímica de Oxigênio significativa sendo direcionada ao plantio para ser aplicada como fertilizante da cana.

O portal ainda explica que a flegma na etapa de retificação é concentrada com graduação de 96 °GL e purificada, logo, é assim que se dá origem ao etanol hidratado. O etanol produzido pode ser armazenado diretamente ou enviado para o processo de desidratação e assim produzir o etanol anidro. Em função do caráter azeotrópico dessa mistura de álcoois, ou seja, misturas que se caracterizam pelo comportamento diferenciado quando submetidas a ebulição, não se pode obter etanol hidratado por meios da destilação simples. Logo para sua obtenção são necessárias três tecnologias existentes e difundidas no Brasil que são: desidratação por meio da adição do ciclo-hexano, destilação extrativa com monoetilenoglicol e adsorção com peneiras moleculares.

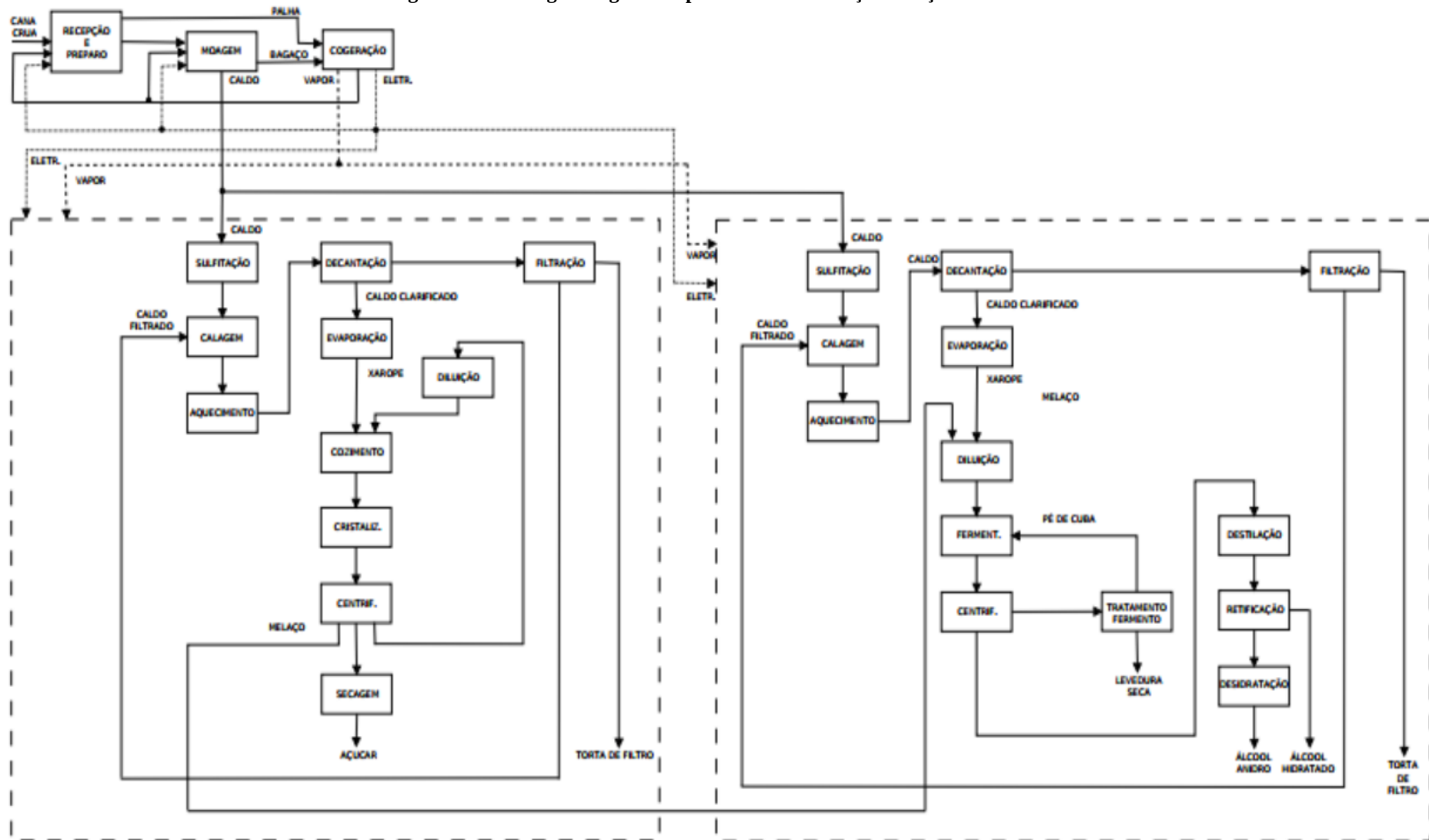
Os maiores consumidores de energia térmica na produção de etanol são os setores de fermentação e destilação, entretanto, como o bagaço disponível para queima é suficiente para fornecer 100% da energia requerida pela destilaria ou usina, essas duas operações persistem até os dias atuais. Os consumos de vapor nas tecnologias de desidratação e destilação permanecem, respectivamente, nas faixas de 3,0 kg a 3,5 kg e 1,5 kg a 2,0 kg de vapor por litro de etanol (CORTEZ, 2010).

Para finalizar a Figura 3.6 apresenta um diagrama de fluxo genérico de processo da produção de etanol e em seguida na Figura 3.7 é ilustrado um fluxo geral que contempla a produção de açúcar e etanol em uma mesma planta industrial com o modelo simplificado brasileiro de produção integrada, elucidando cada etapa do processo.

Figura 3.6 - Fluxograma genérico do processo de fabricação do etanol



Fonte: Seabra (2008).



3.6 PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

O progresso evolutivo do setor energético tanto das destilarias quanto das usinas no Brasil foi tão expressivo quanto o de outras áreas em expansão, porém o ritmo em que esse fato aconteceu foi demasiadamente lento, quando comparado com os outros setores em expansão. Esse fato é devido a dois grandes fatores: o primeiro institucional e o segundo devido ao fato de que o bagaço da cana-de-açúcar é um combustível abundante e sem custos para as usinas, mas que, à primeira vista, não se encontrava outro uso para ele (CORTEZ, 2010).

O autor ainda esclarece que o sistema energético das usinas brasileiras é composto de caldeiras que queimam o bagaço, turbinas de contrapressão para o acionamento dos turbogeradores de energia elétrica e de outros equipamentos mais pesados. O vapor que sai das turbinas, ainda segundo Cortez (2010), é encaminhado ao processo para assim suprir a demanda energética da usina.

Para Cortez (2010), o processamento da cana-de-açúcar é muito intensivo no uso da energia, principalmente no uso da energia térmica para a concentração de caldo, destilação e desidratação do etanol. Nos primórdios do Proetanol, a maioria das usinas utilizava lenha para complementar a queima do bagaço como combustível nas caldeiras. O autor também afirma que uma boa parte da energia elétrica que era utilizada nas operações da usina era comprada das concessionárias a preços ainda muito baixos. Atualmente, as usinas mais avançadas tecnologicamente geram excedentes de eletricidade com finalidade de venda.

O potencial técnico da geração elétrica excedente para exportação das usinas sucroenergéticas no Brasil, a partir da utilização da biomassa produzida pelo seu próprio processo produtivo, tem como principal fator determinante a alternativa tecnológica adotada para o ciclo termoeletrico de cogeração. Outros fatores que também possuem relevância são as alterações técnicas para a redução dos consumos específicos de energia térmica, mecânica e elétrica no processo produtivo do etanol e do açúcar, o aumento da cultura da cana e o método de colheita adotado (TOLMASQUIM, 2004).

O autor complementa que, em relação ao ciclo termoeletrico exercido, podem ser consideradas no setor sucroenergético diversas alternativas tecnológicas para a cogeração e geração de energia elétrica a partir da biomassa da cana-de-açúcar. A classificação dos turbogeradores é referente ao nível de pressão do vapor de saída em relação à atmosfera. No ciclo tradicional de contrapressão, a turbina expande toda a vazão de vapor que recebe

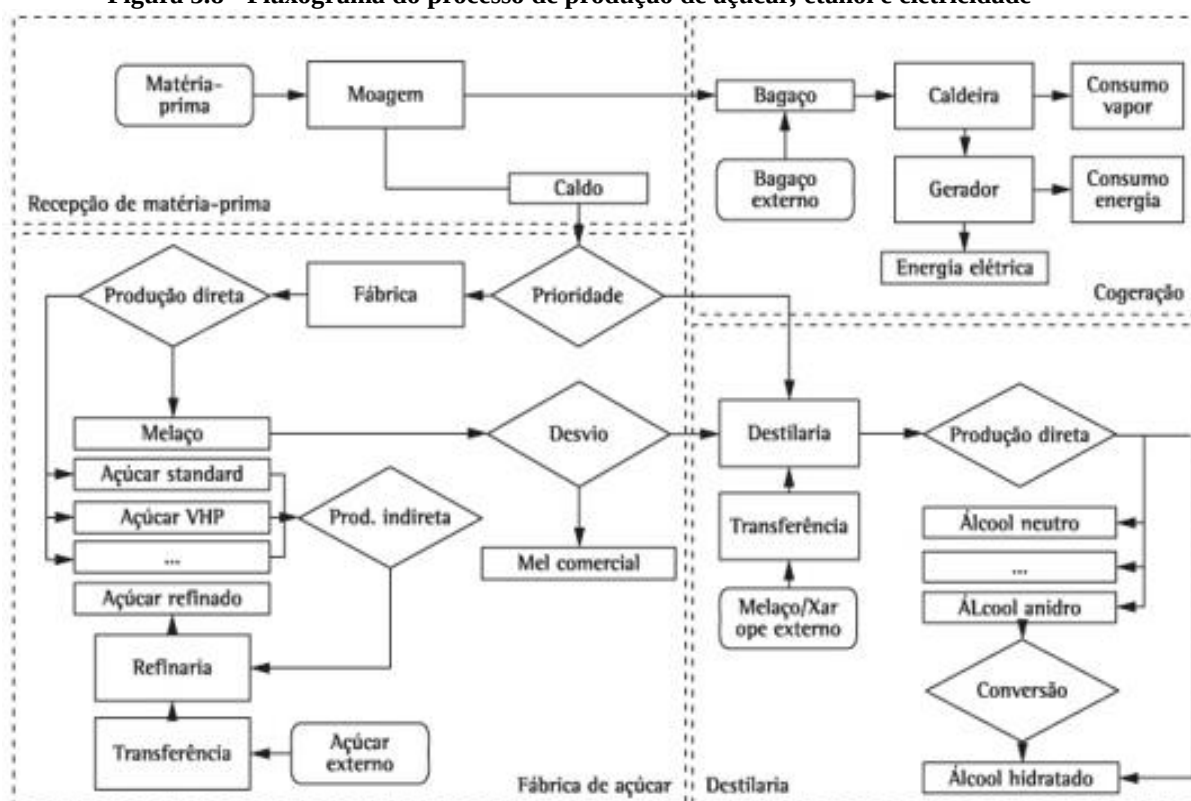
desde uma dada condição inicial, de alta pressão, até níveis superiores à referência, sendo está a opção tecnológica mais usual no setor atualmente.

Para Tolmasquim (2004) nas turbinas de condensação, o vapor encontra-se na saída, em condições de pressão abaixo da atmosférica, assim potencializa a geração de eletricidade, graças à grande diferença de entalpia que ocorre. Além destes sistemas, ainda existem os sistemas integrados de gaseificação da biomassa e turbinas a gás que apresentam eficiências de grau superior aos ciclos com queima direta da biomassa em caldeiras para a geração de vapor.

O autor finaliza dizendo que a estrutura de geração e consumo de energia nas usinas produtoras de etanol e açúcar possuem como característica principal reduzir o desempenho energético em função da necessidade de eliminar integralmente o bagaço e a BRCM que resultam do processamento da cana. As eficiências mecânicas, térmicas e elétricas são demasiadamente baixas e representam um importante potencial a ser explorado com medidas de conservação energética que possibilitariam elevar os excedentes de energia elétrica gerados.

A Figura 3.8 apresenta um fluxograma genérico na produção das três *commodities* derivadas da cana-de-açúcar: açúcar, etanol e eletricidade.

Figura 3.8 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, etanol e eletricidade



Fonte: Paiva e Morabito (2013)

3.7 APROVEITAMENTO DA BRCM PARA COGERAÇÃO

Segundo o BNDES (2021), ainda existe um potencial adicional não explorado para a cogeração que envolve o aproveitamento da BRCM, deixada no solo após a colheita. Nos últimos anos, o Brasil vem desenvolvendo um grande trabalho em busca de melhorias nas técnicas de coleta e transporte da BRCM, assim como para a avaliação da sua disponibilidade real.

Com o tempo a utilização do bagaço de cana em um processo de cogeração se tornou rotineiro no setor, pois permitia a produção de energia térmica, direcionada para o processo industrial, e energia elétrica destinada à movimentação mecânica, à iluminação e a outros fins na indústria. Contudo, a falta de visão do setor elétrico impedia a exportação de excedentes, fosse pelas dificuldades encontradas frente à legislação, pois esta defendia o monopólio existente na época, ou pela cultura centralizadora que predominava no Setor Elétrico Brasileiro (SEB) e geradora de soluções hidrelétricas de grande porte (ROMÃO JÚNIOR, 2009)

Tais características segundo o autor acabaram inibindo, totalmente, a queima do bagaço de forma eficiente. Os investimentos eram direcionados não visando à potencialidade intrínseca do combustível, mas sim considerando a necessidade exigida pelo processo industrial. Devido a essa falta de visão, as unidades cogeradoras instaladas tornaram essa combustão ineficiente, com desperdícios significativos nas quantidades de energia potencialmente presentes tanto no bagaço quanto na BRCM.

Perante a proximidade do fim da vida útil destas unidades, da evolução tecnológica e das alterações da legislação que estão acontecendo no setor elétrico, as dificuldades em vender a eletricidade excedente produzida à rede, só ocorreram em virtude da inércia da cultura centralizante que predomina nesse setor. Entretanto, essas alterações passam a permitir o compartilhamento das linhas de transmissão e das redes de distribuição, ou seja, passam a incentivar a concorrência na geração de energia elétrica (MARIANI FILHO, 2006).

Além disso, ainda segundo Mariani Filho (2006), a BRCM que, neste período inicial, ainda não era utilizada por motivos oriundos da evolução pela qual o setor estava passando, em relação aos avanços tecnológicos ocorridos tanto na cultura da cana-de-açúcar quanto nos equipamentos e processos de cogeração, passa a contribuir com a cogeração energética, fato que aumentou de forma expressiva a capacidade energética do setor sucroenergético.

Os colmos, a BRCM e boa parte dos ponteiros da cana-de-açúcar são simultaneamente processados quando a colheita se dá de forma mecânica até a fase de separação pneumática na qual ocorre o descarte da BRCM no solo e os rebolos de cana são priorizados e transportados até o transbordo como cita Holzhausen (2010). São apontadas duas importantes mudanças nos processos atuais de recuperação da BRCM que contribuem para acelerar seu aproveitamento energético: aumentar sua densidade no ato da colheita e eliminar o manuseio intenso com seus correspondentes custos e a contaminação com terra, diz o autor.

Segundo Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2021), a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) como representante da indústria paulista produtora de açúcar, etanol e bioeletricidade e o Governo do Estado de SP, assinam no dia 04 de junho de 2007 o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista. Este documento, com adesão voluntária, constitui uma série de diretivas técnicas e princípios, de cunho ambiental, a serem examinadas pelas indústrias canavieiras.

Ainda segundo o Protocolo, as usinas do setor sucroenergética paulistas em sua maioria se comprometeram a antecipar o cronograma de diminuição da queima nas lavouras de cana-de-açúcar no estado, que anteriormente eram fixados pela Lei Estadual Nº 11.241/02. Com essa antecipação as usinas deveriam eliminar 100% da queima nas áreas mecanizadas e até 2017, o fogo deveria ser eliminado inclusive nas áreas não mecanizadas.

A agroindústria canavieira nacional, em 2008 negociou cerca de 2.245 MW e grande parte deste total, por volta de 1.500 MW, foram entregues ainda em 2008. Porém, as previsões são de que esse potencial será ainda maior nos anos seguintes. Segundo cálculos da própria entidade, com previsões do setor de alcançar a proporção de 1 bilhão de toneladas em 2020, e se ocorrer um aproveitamento de 50% da BRCM e 75% do bagaço para gerar eletricidade excedente, teria potencial de geração de 28.000 MW, o que estaria em pé de igualdade com cerca de duas usinas de Itaipu (EDITORA VALETE, 2021).

3.7.1 Sistema para Separação da BRCM

Devido à rápida expansão da cana no Estado de São Paulo, as práticas ambientais precisaram ser revistas de modo a transformar as novas áreas de produção em ambientes sustentáveis. Foi a Lei 11.241/2002 que dispõe sobre a eliminação gradativa das

queimadas da BRCM e que prevê, para o ano de 2031, 100% de eliminação dessa prática para um ambiente de sustentabilidade, por meio do Protocolo Agroambiental firmado em 2007 pelo Governo do Estado de São Paulo e a UNICA esses prazos foram adiantados. A Tabela 3.3 apresenta estes prazos que foram estabelecidos para a eliminação da queimada no Estado de São Paulo (SILVA, 2011).

Tabela 3.3 - Prazos de eliminação da queima da cana-de-açúcar

Ano	Área mecanizável onde a queima não pode ocorrer
2010	70% da queima eliminada
2014	100% da queima eliminada
Ano	Área não mecanizável, declive superior a 12%
2010	30% da queima eliminada
2017	100% da queima eliminada

Fonte: Lucon (2008).

A EMBRAPA (2021) afirma que, pelo aumento da mecanização aplicado às colheitas e a diminuição das queimadas, cresceu significativamente a quantidade da BRCM que é coletada nos talhões e vai para as usinas, assim como outros resíduos minerais que acompanham a cana-de-açúcar. Segundo Salgado Junior (2014) se faz necessário separar as impurezas da cana-de-açúcar para evitar grandes perdas de sacarose no processo industrial e, atualmente, o melhor sistema para realizar esta operação é conhecido como Sistema de Limpeza de Cana a Seco (SLCS).

A BRCM picada detém mais áreas de atração das impurezas, tal que, se a usina lavar a cana-de-açúcar picada, a queda de açúcar será na ordem de 5% o que torna essa prática proibida. Uma tonelada de cana-de-açúcar possui 150 kg de sacarose em média, porém 2% deste volume pode ser perdido no processo de lavagem, temos também ciência de que entre 4% e 6% são eliminados no processo de moagem ou no difusor (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

Por meio do SLCS uma parte desta perda pode ser evitada, para isso dois fatores são determinantes para a obtenção destes resultados de acordo com a Revista Alcoolbras (2021): primeiro quando a usina remove a impureza vegetal (BRCM) e este material fica impedido de ‘roubar’ sacarose do caldo durante o processo de extração e o segundo permite que a usina diminua o tempo de moagem e, conseqüentemente, ajuste a safra para um período maior de maturação de cana, o que renderá maior concentração de sacarose.

Ainda segundo a revista, o sistema de ventilação foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) em parceria com o Instituto Tecnológico de Aeronáutica

(ITA). A técnica utilizada se assemelha muito à utilizada no túnel de vento para testar aviões e a ação mecânica é realizada pelos separadores, ou em mesas de fundo furado realizando o revolvimento para realizar a separação das partículas. Para finalizar a Revista ainda diz que ambos os processos retiram resíduos sólidos o que faz a cana chegar limpa na moenda ou no difusor. O sistema, atualmente, segundo a CTC, apresenta eficiência de 70% na separação de impurezas minerais e vegetais aproximadamente.

Romão Júnior (2009) diz que, além da restrição imposta pelo processo mecanizado, o aumento da utilização do SLCS pode ser determinado pela necessidade da usina em realizar o aumento da capacidade de moagem. Quando a usina opera no limite da capacidade, cada tonelada da BRCM que entra no processo de moagem representa uma perda de moagem de uma tonelada de cana. Ainda por cima, o teor da fibra da BRCM é maior quando comparado ao da cana, o que diminui ainda mais a capacidade de moagem. Logo, a usina não deixa de moer apenas uma tonelada de cana, acaba deixando de moer uma quantia um pouco maior pela interferência dessa fibra da BRCM dentro das moendas.

Por este motivo se fez necessário que a BRCM passasse por um processo para transformá-la em pedaços menores, para assim serem misturados ao bagaço e, depois queimados nas caldeiras convencionais. A solução que se tornou mais popular foi a utilização de picadores que são um equipamento simples, compostos por um rotor com facas que faz com que a BRCM passe por um cesto e realizam a transformação da BRCM de fibras longas em BRCM picada (REVISTA ALCOOLBRAS, 2021).

3.8 CADEIA DE ABASTECIMENTO DA BIOENERGIA

Segundo Sindhu et al. (2016), nos países subtropicais e tropicais, a cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas existentes tanto do ponto de vista social, cultural ou econômico. A área e a produtividade de cana-de-açúcar costumam variar de um país para outro, com estimativas de cultivo em 200 países do globo terrestre, sendo a Ásia a região que mais contribui com a produção mundial com um total de 44%, já a América do Sul contribui com um total de 34%.

Asocaña (2021) diz que 92% da cana-de-açúcar colhida no mundo destina-se à produção açucareira, assim, a produção e os fluxos comerciais do açúcar concentram-se nos países considerados como os grandes produtores, exportadores e importadores, como por exemplo, Brasil, Tailândia, Índia, União Europeia, China e Austrália.

Diversos estudos foram desenvolvidos em relação ao aproveitamento dos resíduos da cultura da cana-de-açúcar relacionada à produção da bioenergia. Tais resíduos podem ser utilizados como matéria-prima na produção não apenas da bioenergia, mas também do biocombustível. Por meio da utilização desses recursos problemas e preocupações ambientais podem e devem ser evitados. Cada país possui um conjunto único de resíduos de colheita que podem ser utilizados para tais gerações (GO et al 2019).

Tem-se como principais atividades da indústria canavieira a lavoura, a colheita e a fábrica (usina de açúcar e destilaria). A BRCM é um subproduto derivado das atividades agrícolas. Pode-se perceber que a BRCM não está sendo aproveitada na quantia exigida pelas atuais circunstâncias, porque temos para cada tonelada de cana-de-açúcar 70% a 80% de hastes limpas, o restante é conhecido como resíduos de culturas, que podem ser folhas verdes, folhas secas, etc, essas porcentagens são valores estimados (CADAVID et al., 2019).

Ainda segundo os autores, a BRCM pode ser utilizada de diversas maneiras, tais como: melhoramento dos solos, ração animal, geração de energia, construção de pranchas, fichários para construção e produtos artesanais, etc.

Segundo Pierossi e Bertolani (2018), o processo de coleta pode ser feito em dois locais normalmente: nos chamados centros de coleta também conhecidos como postos de limpeza, ou no próprio campo de colheita. Referente aos aspectos de manuseio dos resíduos, um considerado de suma importância é o transporte desse resíduo devido ao seu impacto técnico-econômico.

A densidade do resíduo agrícola é considerada baixa e a quantidade que pode ser coletada é limitada pelo seu volume e não pelo peso. Logo, o uso de todo espaço disponível para o transporte é essencial para que a economia seja maior. Por este motivo, tratamentos mecânicos foram realizados para eliminarem a heterogeneidade geométrica do resíduo, possibilitando que ocorra uma compactação para uso posterior. Por último, existe uma ressalva de se manter 50% desse resíduo no campo para preservar as condições adequadas do solo (MARTÍNEZ et al., 2013).

De acordo com Cadavid et al. (2019) a BRCM é um recurso energético importante para o setor açucareiro, porém a sua utilização precisa suprir alguns desafios técnicos, como por exemplo, seu baixo conteúdo energético comparado com combustíveis fósseis tradicionais. Tendo sua baixa densidade (100 kg/m^3) somada as suas observâncias energéticas, faz com que os volumes de biomassa necessários para suprir as necessidades energéticas para substituir o carvão, por exemplo, utilizado nas caldeiras das usinas sejam

significativamente elevados

Ainda neste âmbito, os autores afirmam que para suprir a potência calorífica de uma tonelada de carvão são necessárias 1,53 toneladas da BRCM. Um fator importante da realização dessa substituição é a produção de Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico (CO_2), já que uma tonelada de carvão produz em média 2254 Kg de CO_2 equivalente, em contrapartida 1,53 toneladas da BRCM geram em média 53,7 Kg de CO_2 equivalente.

Segundo De Meyer (2014), as decisões de otimização preferencialmente referem-se à escolha de culturas não-alimentares, à coordenação do transporte, pré-tratamento e ao armazenamento a nível operacional, tático e estratégico e o uso de tecnologias avançadas e eficientes de conversão de biomassa em bioenergia são para permitir reduções significativas nos custos ambientais e de produção de biomassa.

O passo inicial no estudo de modelos que envolvem a otimização da cadeia de abastecimento de bioenergia seria construir descrição, identificação e classificação das principais decisões de otimização para os níveis operacionais, táticos e estratégicos (AGUSTINA et al., 2018). Segundo Sharma et al. (2013), as atividades como: preparação e condicionamento, transporte, armazenamento e processamento para geração de energia são consideradas nas decisões relacionadas à cadeia de abastecimento de biomassa para conversão de energia.

Ainda segundo os autores, tais decisões, normalmente, são tomadas em diferentes níveis. Decisões de nível estratégico: tipo de tecnologia, tipo de biomassa, contratação, seleção do modo de transporte, projeto da rede de abastecimento, níveis de estoque, etc. Decisões de nível tático: condições de armazenamento, roteamento de veículos, programação de colheita.

Para Cadavid et al. (2019) utilizar os residuais da cana-de-açúcar como combustível substituto em sistemas de cogeração de energia tornam-se um tema recorrente de pesquisas com enfoque na busca de sistemas de geração de energia com menor impacto ambiental.

Segundo Go e Conag (2019) recorrente da colheita uma quantidade substancial de biomassa é deixada para trás, a BRCM. Tais resíduos costumam ser deixados nos campos para se decomporem e fertilizarem o solo para um novo plantio, entretanto existe um novo interesse crescente na realização de sua coleta e transporte até as usinas para que ocorra sua queima para produzir eletricidade.

Segundo Pippo et al. (2009) e Pereira et al. (2015) as usinas de cana-de-açúcar atualmente buscam suas independências em relação à rede elétrica interligada, pois

podem gerar eletricidade excedente para venda. Algumas usinas ainda utilizam a queima do carvão nas caldeiras para gerar vapor e eletricidade para uso geral, porém o uso da BRCM possui vantagens aparentes sobre o carvão, como: geram menos CO₂, custos com compra de carvão, a BRCM é basicamente livre, etc.

Neste intuito, o modelo proposto neste trabalho, busca sanar essas questões, realizando a seleção dos talhões para que ocorra a coleta da BRCM, ajudando na redução do uso de outros combustíveis que são mais poluentes e, ao mesmo tempo, fazer com que as usinas se aproximem de suas independências energéticas por meio do aumento da cogeração de energia.

Será apresentado no próximo capítulo o modelo matemático para o planejamento da produção e cadeia de suprimentos para cogeração (PPCSC) proposto por este trabalho.

4 MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E CADEIA DE SUPRIMENTOS PARA COGERAÇÃO (PPCSC)

O objetivo deste capítulo é apresentar o modelo matemático proposto para o PPCSC. Tal modelo visa maximizar o balanço econômico por meio do *mix* de produção de uma usina sucroenergética e decidir em quais talhões deve ser realizada a colheita da cana e os talhões em que deve ser realizada a coleta adicional da BRCM para complementar a cogeração.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As usinas de cogeração de energia por meio da utilização da cana-de-açúcar estão se tornando cada vez mais comuns, devido ao beneficiamento que a venda dos excedentes de energia ocasiona nas receitas da usina. Entretanto, problemas com o planejamento da produção dos produtos derivados da cana-de-açúcar, como o açúcar e o etanol e a produção da eletricidade, como consequência dessa produção de ambos os derivados, passaram a surgir nos empreendimentos. Assim, um dos problemas dessas usinas é como deve ser a alocação dos recursos para a produção dos produtos derivados da cana.

Outro problema que as usinas passaram a enfrentar foi que, após a extinção das queimadas, foi necessário dar um novo destino para a BRCM, como por exemplo, na produção do E2G e da bioenergia. Graças às novas tecnologias que estão surgindo e a cada vez mais o aumento do aproveitamento da BRCM nas usinas para auxiliarem nos processos, em especial nas usinas de cogeração, o problema foi solucionado por meio da coleta e uso destes resíduos, porém é necessário o planejamento logístico dessa cadeia de abastecimento.

O modelo matemático para o PPCSC proposto neste trabalho, considera a operação industrial sucroenergética em que sua manufatura de bens, tais como as *commodities* açúcar e etanol, assim como a cogeração de eletricidade excedente a partir de um mesmo recurso, ou seja, a cana-de-açúcar, aconteça de forma simultânea. Nas operações industriais, considera-se a produção das energias térmica, mecânica e elétrica para sanar as necessidades internas da usina, considerando o uso dos recursos derivados da cana, como a BRCM, o bagaço, o caldo e o melaço.

Adicionalmente, o modelo proposto para o PPCSC objetiva selecionar de quais talhões deve ser realizada a colheita da cana-de-açúcar e a coleta da BRCM, esta última

para complementar a cogeração de energia. Parte da BRCM de cada talhão é transportada agregada à cana e então utilizada para cogeração de energia. Devido às capacidades de geração de energia das usinas e ao lucro resultante da venda da energia excedente, pode haver necessidade de coletar mais BRCM nos talhões. O modelo proposto visa determinar os talhões nos quais deve ser realizada essa coleta adicional da BRCM. Assim, de forma integrada o modelo auxilia na tomada de decisões tanto no planejamento produtivo quanto no planejamento da cadeia de suprimentos.

4.2 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA PPCSC PROPOSTO

O modelo proposto tem como base os modelos apresentados por Silva (2011) do qual são baseadas as restrições de seleção dos talhões para colheita e transporte da cana-de-açúcar, Carvalho Junior (2016), do qual adotou-se as restrições referentes ao atendimento das demandas e as restrições de recursos e Cadavid et al. (2019), do qual adotou-se as restrições de seleção de coleta da BRCM.

Assim, este trabalho propõe um modelo matemático de otimização, construído a partir dos modelos apresentados por esses três trabalhos citados, de forma a construir um modelo integrado que considera, ao mesmo tempo, a seleção dos talhões para realização da colheita e transporte da cana, a produção sucroenergética e a seleção dos talhões em que a coleta da BRCM deve ocorrer.

A função objetivo e as restrições que compõem o modelo matemático de otimização para o PPCSC, propostas neste trabalho serão detalhadas a seguir. Na notação adotada, as variáveis de decisão e auxiliares do modelo são denotadas por letras minúsculas e os parâmetros por letras maiúsculas e letras gregas.

4.2.1 Nomenclatura

ÍNDICES

- i: commodities, $i \in \{1, 2, 3\}$ (açúcar VHP, etanol anidro, etanol hidratado);
- j: recursos, $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ (BRCM, bagaço, caldo, melaço);
- h: energias internas, $h \in \{1, 2, 3\}$ (térmica, mecânica, elétrica);

- k : talhões disponíveis para coleta da BRCM, $k \in \{1, \dots, K\}$;
- m : talhões disponíveis para colheita da cana-de-açúcar, $m \in \{1, \dots, M\}$

VARIÁVEIS DE DECISÃO

- x^e : quantidade da *commodity* eletricidade excedente produzida (em MW);
- x_i^c : quantidade da *commodity* i produzida (em ton ou m^3);
- x_{ij}^{cr} : quantidade da *commodity* i produzida a partir do recurso j (em ton/ton ou m^3 /ton);
- x_{hj}^{er} : quantidade da energia h , para atender a demanda interna, produzida a partir do recurso j (em MW/ton);
- x_{3j}^{er} : quantidade da energia elétrica, para atender a demanda interna, produzida a partir do recurso j (em MW/ton);
- x_k : quantidade da BRCM coletada no talhão k (em ton);
- y_k : variável binária que assume 1 se há coleta da BRCM do talhão k , 0 caso contrário;
- z_m : variável binária que assume 1 se há colheita de cana-de-açúcar do talhão t , 0 caso contrário.

VARIÁVEIS AUXILIARES

- d_h : demanda interna da energia h necessária para a produção sucroenergética (em MW);
- d_1 : demanda da energia térmica necessária na usina (em MW);
- d_2 : demanda da energia mecânica necessária na usina (em MW);
- d_3 : demanda da energia elétrica necessária na usina (em MW);
- q^c : quantidade total de cana-de-açúcar colhida disponível para moagem (em ton);

x_{ji}^{rc} :	quantidade do recurso j necessária para produzir a <i>commodity</i> i (em ton);
x_{jh}^{re} :	quantidade do recurso j necessária para produzir a energia h para atender a demanda interna (em ton);
x_{1h}^{re} :	quantidade do recurso BRCM necessária para produzir a energia h para atender a demanda interna (em ton);
x_{2h}^{re} :	quantidade do recurso bagaço necessária para produzir a energia h para atender a demanda interna (em ton);

PARÂMETROS

A_m	área do talhão m (em ha);
C_{ij}^C :	custo de produção da <i>commodity</i> i produzida a partir do recurso j (em R\$/ton);
C_{hj}^E :	custo de produção da energia h, para atender a demanda interna, produzida a partir do recurso j (em R\$/ton);
C_k^F :	custo fixo de coleta da BRCM do talhão k (em R\$);
C_k^T :	custo de transporte da BRCM do talhão k à usina (em R\$/(ton/Km));
C_m^M	custo de colheita mecanizada e transporte da cana-de-açúcar do talhão m até a usina (em R\$);
D_k :	distância entre o talhão k e a usina (em Km);
D_i^C :	demandada da <i>commodity</i> i, a ser atendida pela usina (em ton ou m ³);
D_{aux}^E :	demandada elétrica consumida na usina (em MW);
E_k^D :	número de equipes disponíveis para a coleta da BRCM disponível no talhão k;
P_i^C :	preço unitário da <i>commodity</i> i produzida (em R\$/ton ou R\$/m ³);
P^E :	preço unitário da <i>commodity</i> eletricidade excedente (em R\$/MW);
P^Q :	capacidade da usina de processamento da BRCM (em ton);

P^R	produtividade média de cana-de-açúcar (em ton/ha);
Q_{moa}^C	capacidade de moagem da usina (em ton/dia);
Q_{ij}^E	quantidade de energia elétrica necessária para produzir a <i>commodity</i> i, a partir do recurso j (em MW/ton);
Q_{moa}^E	quantidade de energia elétrica consumida na etapa de moagem da cana (em MW/ton);
Q_{rec}^E	quantidade de energia elétrica consumida na etapa de recepção da cana (em MW/ton);
Q_{moa}^M	quantidade de energia mecânica consumida na etapa de moagem da cana (em MW/ton);
Q_k^P	quantidade da BRCM disponível no talhão k para coleta (em ton);
Q_j^R	quantidade do recurso j disponível para cada tonelada de cana-de-açúcar processada (em ton);
Q_1^R	quantidade do recurso BRCM disponível para cada tonelada de cana-de-açúcar processada (em ton);
Q_2^R	quantidade do recurso j disponível para cada tonelada de cana-de-açúcar processada (em ton);
Q_{ij}^T	quantidade de energia térmica (vapor de processo) necessária para produzir a <i>commodity</i> i, a partir do recurso j (em MW/ton);
η_{jh}^R	coeficiente de transformação do recurso j em energia h (em ton/MW).
η_{ji}^R	coeficiente de transformação do recurso j para a <i>commodity</i> i (em ton/ton ou ton/m ³);

O modelo para o PPCSC que será apresentado visa à gestão da fabricação dos principais derivados e subprodutos comerciais oriundos de uma mesma matéria-prima, levando em conta o aproveitamento da BRCM e a diversificação das fontes de energia em uma planta típica. O objetivo do modelo é atingir o máximo benefício entre as receitas e os custos de uma usina sucroenergética, estes últimos, junto aos preços de comercialização de cada *commodity*. É considerado a produção dos derivados, a partir

dos recursos da cana-de-açúcar com seus preços de mercados, custos de produção, custos logísticos e custos de coleta da BRCM nos talhões, respectivamente.

4.2.2 Função Objetivo

Em (1) a função objetivo é apresentada.

$$\max Z = BE \quad (1)$$

Tem-se como objetivo maximizar o balanço econômico da usina que representa a diferença entre receita e custos. O balanço econômico é formado pela soma da receita obtida pelas vendas das *commodities* somada à receita obtida pela venda da eletricidade excedente, menos os custos de produção das *commodities*, custo de produção para atendimento das demandas energéticas internas, custos de logística e transporte da BRCM e custos de colheita e transporte da cana-de-açúcar conforme (2).

$$BE = (RC + RE) - (CC + CE + CF + CT + CCT) \quad (2)$$

em que:

BE:	Balanço Econômico (em R\$);
RC:	receita obtida pela venda das <i>commodities</i> (em R\$);
RE:	receita obtida pela venda da energia elétrica excedente (em R\$);
CC:	custo com a produção das <i>commodities</i> (em R\$);
CE:	custo com a produção das energias para atendimento da demanda interna (em R\$);
CF:	custo fixo total de coleta da BRCM nos talhões (em R\$);
CT:	custo de transporte da BRCM dos talhões até a usina (em R\$);
CCT:	custo de colheita e transporte da cana-de-açúcar dos talhões até a usina (em R\$).

A RC é calculada pelo somatório realizado entre o produto dos preços de venda pelas quantidades das *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado produzidas conforme (3).

$$RC = \sum_{i=1}^3 (P_i^C x_i^c) \quad (3)$$

A RE é calculada pelo produto do preço de venda pela quantidade de energia elétrica excedente produzida conforme (4).

$$RE = P^E x^e \quad (4)$$

O CC é calculado pelo somatório do produto entre o custo para produzir as *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado a partir dos recursos caldo e melaço pelas quantidades das *commodities* i produzidas a partir dos recursos j, conforme (5).

$$CC = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (C_{ij}^C x_{ij}^{cr}) \quad (5)$$

O CE calculado em (6) é obtido por meio do somatório do produto entre o custo para produzir as energias térmica, mecânica e elétrica para atendimento da demanda interna a partir dos recursos BRCM e bagaço pelas quantidades produzidas de energias h, para atendimento da demanda interna pelos recursos j.

$$CE = \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^2 (C_{hj}^E x_{hj}^{cr}) \quad (6)$$

Podemos observar que também são avaliadas as demandas energéticas internas necessárias para a produção de cada *commodity* dada pela relação recurso-*commodity*, bem como os custos correspondentes. O CF é calculado em (7) pelo somatório entre o produto do custo fixo de coleta da BRCM no talhão k pela variável binária y_k , a qual assume 1 se há coleta da BRCM do talhão k 0 caso contrário.

$$CF = \sum_{k=1}^K (C_k^F y_k) \quad (7)$$

Segundo Cadavid et al. (2019) o CF é referente ao salário fixo do motorista do veículo e o custo de propriedade do referido veículo e não depende das toneladas transportadas nem da distância. O custo de operação dos veículos está incluído no

parâmetro CT.

O CT em (8), é obtido pelo somatório do produto entre a distância do talhão k até a usina pelo custo de transporte da BRCM do talhão k até a usina pela quantidade da BRCM disponíveis para coleta em cada talhão k.

$$CT = \sum_{k=1}^K (D_k C_k^T x_k) \quad (8)$$

Por último temos em (9) o CCT obtido por meio do somatório entre o produto do custo para realizar a colheita e transporte da cana-de-açúcar do talhão m até a usina pela variável binária z_m , variável que assume 1 se há colheita de cana-de-açúcar no talhão m.

$$CCT = \sum_{m=1}^M C_m^M z_m \quad (9)$$

Temos que o custo para realizar a colheita e transporte da cana-de-açúcar do talhão m até a usina segundo Silva (2011) é calculado conforme (10).

$$C_m^M = (C_{co} + (C_{med} D_m^T)) A_m \quad (10)$$

em que:

C_m^M	custo de colheita mecanizada e transporte da cana-de-açúcar do talhão m até a usina (em R\$);
C_{co}	custo de corte da cana-de-açúcar (em R\$/ha);
C_{med}	custo médio de transporte da cana-de-açúcar (em R\$/km);
D_m^T	distância do talhão m ao centro de processamento (em km);
A_m	área do talhão m (em ha).

Em (10) temos que o custo da colheita mecanizada e transporte da cana-de-açúcar até o centro de processamento é dado pela soma do custo de corte da cana pelo produto entre o custo médio de transporte da cana pela distância do talhão m até o centro de processamento e a esse valor se multiplica a área do talhão m. A seguir são descritas as restrições do modelo, separadas por grupos.

4.2.3 Restrições de Atendimento às Demandas de *Commodities*

As restrições de atendimento às demandas das *commodities* são dadas por (11).

$$\sum_{j=3}^4 x_{ij}^{cr} \geq D_i^C, i \in \{1, 2, 3\} \quad (11)$$

Em (11) temos que as quantidades das *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado produzidas a partir dos recursos caldo e melaço devem ser maiores ou iguais as demandas destas.

4.2.4 Restrições de Atendimento às Demandas Energéticas

As restrições (12) apresentam um grupo de restrições referentes ao atendimento das demandas energéticas internas para a produção de cada derivado da cana-de-açúcar a partir dos recursos que estão disponíveis.

$$\sum_{j=1}^2 x_{hj}^{er} \geq d_h, h \in \{1, 2, 3\} \quad (12)$$

Em (12) temos que a quantidade das energias térmica, mecânica e elétrica para atender as demandas internas produzidas a partir dos recursos BRCM e bagaço devem ser maiores ou iguais que as demandas energéticas internas necessárias para a produção sucroenergética.

Nas restrições (13) à (15), são calculados os valores das demandas energéticas internas. Tem-se em (13) que a demanda de energia térmica necessária na usina deve ser igual ao produto da quantidade de energia térmica necessária para produzir as *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado pela quantidade da *commodity* *i*, produzida a partir dos recursos caldo e melaço.

$$d_1 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (Q_{ij}^T x_{ij}^{cr}) \quad (13)$$

Em (14) a demanda de energia mecânica necessária na usina precisa ser igual ao produto entre a quantidade de energia mecânica consumida para a moagem de uma

tonelada de cana-de-açúcar pela quantidade de cana-de-açúcar disponível para a moagem.

$$d_2 = Q_{\text{moa}}^M q^c \quad (14)$$

Em (15) tem-se que a demanda de energia elétrica necessária na usina é igual a soma da quantidade de energia elétrica consumida na etapa de recepção, mais a quantidade de energia elétrica consumida na etapa de moagem, multiplicadas pela quantidade de cana-de-açúcar disponível para a moagem; e esse termo é somado ao produto da quantidade de energia elétrica necessária para produzir as *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado pela quantidade da *commodity* i produzida a partir dos recursos caldo e melaço mais a demanda elétrica auxiliar consumida na usina.

$$d_3 = (Q_{\text{rec}}^E + Q_{\text{moa}}^E) q^c + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (Q_{ij}^E x_{ij}^{\text{cr}}) + D_{\text{aux}}^E \quad (15)$$

4.2.5 Restrições de Recursos

O grupo de restrições (16) à (19) apresenta as relações entre recursos e as *commodities* produzidas e também os recursos e as demandas energéticas necessárias. Tais relações são obtidas por meio da relação entre os rendimentos para cada relação recurso-*commodity* e recurso-energia.

Nas restrições (16) a quantidade das *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado produzidas a partir dos recursos caldo e melaço deve ser igual ao produto da quantidade dos recursos j necessários para produzirem as *commodities* i pelo coeficiente de transformação dos recursos j nas *commodities* i (em ton/ton ou ton/m³).

$$x_{ij}^{\text{cr}} = x_{ji}^{\text{rc}} \eta_{ji}^R, \quad i = 1, 2, 3 \text{ e } j = 3, 4 \quad (16)$$

Em (17) tem-se que a quantidade das energias térmica, mecânica e elétrica, para atender a demanda interna, produzida a partir dos recursos BRCM e bagaço, precisa ser igual ao produto dado pelas quantidades dos recursos j necessários para a produção das energias h pelo coeficiente de transformação dos recursos j em energias h (em ton/MW).

$$x_{hj}^{\text{er}} = x_{jh}^{\text{re}} \eta_{jh}^R, \quad h \in \{1, 2, 3\}; j \in \{1, 2\} \quad (17)$$

Nas restrições (18) têm-se que as quantidades das *commodities* açúcar, etanol anidro e etanol hidratado produzidas precisa ser igual às quantidades das *commodities* i produzidas a partir dos recursos caldo e melaço.

$$x_i^c = \sum_{j=3}^4 x_{ij}^{cr}, i \in \{1, 2, 3\} \quad (18)$$

Em (19), a quantidade da *commodity* eletricidade excedente produzida é igual ao somatório da quantidade da energia elétrica produzida a partir dos recursos BRCM e bagaço decrescido da demanda da energia elétrica necessária para a produção.

$$x^e = \sum_{j=1}^2 x_{3j}^{er} - d_3 \quad (19)$$

Além desse grupo de restrições referentes aos recursos, a condição presente nas restrições (20) à (22) devem ser atendidas. Elas se referem ao limite dos recursos j , uma vez que os mesmos são frações de um mesmo insumo, ou seja, a cana-de-açúcar, que são restringidos pela quantidade de matéria-prima disponível.

Em (20) tem-se que o somatório das quantidades dos recursos caldo e melaço necessários para produzir as *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado deve ser menor ou igual ao produto entre as quantidades dos recursos j disponíveis por cada tonelada de cana-de-açúcar processada pela quantidade total de cana-de-açúcar disponível para moagem.

$$\sum_{i=1}^3 x_{ji}^{rc} \leq Q_j^R q^c, j \in \{3, 4\} \quad (20)$$

Em (21) tem-se que a quantidade do recurso bagaço necessário para produzir as energias térmicas, mecânica e elétrica deve ser menor ou igual ao produto entre a quantidade de recurso j disponível por cada tonelada de cana-de-açúcar processada pela quantidade total de cana-de-açúcar disponível para moagem.

$$\sum_{h=1}^3 x_{2h}^{re} \leq Q_2^R q^c \quad (21)$$

Em (22) tem-se que a quantidade do recurso BRCM necessária para produzir as energias térmicas, mecânica e elétrica deve ser menor ou igual ao produto entre quantidade de recurso j disponível por cada tonelada de cana-de-açúcar processada pela quantidade total de cana-de-açúcar disponível para moagem e a esse valor ainda deve ser acrescida a quantidade total da BRCM coletada no talhão k .

$$\sum_{h=1}^3 x_{1h}^{re} \leq (Q_1^R q^c) + \sum_{k=1}^K x_k \quad (22)$$

Em (23) temos a última restrição de recurso que se refere à capacidade da usina em processar a BRCM (triturar e queimar). Tem-se em (23) que a quantidade da BRCM na cana-de-açúcar processada somada à quantidade da BRCM colhida nos talhões, deve ser menor ou igual que à capacidade de processamento da BRCM da usina.

$$(Q_1^R q^c) + \sum_{k=1}^K x_k \leq P^Q \quad (23)$$

4.2.6 Restrições de Seleção dos Talhões para Coleta da BRCM

As restrições (24) e (25) referem-se à seleção dos talhões para a coleta da BRCM. Em (24) tem-se que o número de talhões nos quais a BRCM deve ser coletada é limitado pelo número de equipes disponíveis para a coleta.

$$\sum_{k=1}^K y_k \leq E_k^D \quad (24)$$

Em (25) temos que a quantidade da BRCM coletada em cada talhão é limitada pela quantidade da BRCM disponível no talhão para coleta. A coleta da BRCM deve ocorrer após a colheita da cana-de-açúcar nos talhões, e é feita essencialmente de 7 a 10 dias após a colheita. Segundo Cadavid et al. (2019) a quantidade total da BRCM gerada em cada talhão k depende: de sua área, da variedade da cana-de-açúcar cultivada e das ferramentas de colheita em uso.

Ressalta-se que é considerado que a quantidade da BRCM disponível em cada talhão para coleta (Q_k^P) já é decrescida da quantia (50% do total) que deve permanecer no solo para geração de adubo para o próximo plantio conforme cita Martínez et al. (2013)

na seção 4 desta dissertação.

$$x_k \leq Q_k^p y_k, k \in \{1, \dots, K\} \quad (25)$$

4.2.7 Restrições de Seleção dos Talhões para Colheita da cana

As restrições (26) referem-se à colheita e transporte da cana-de-açúcar até o centro de processamento. Tem-se em (26) que a quantidade total de cana colhida e transportada até a usina (q^c) deve ser igual ao somatório da multiplicação realizada entre a produtividade média da cana pela área do talhão m onde a cana será colhida pela variável binária z_m que assume valor 1 se a cana-de-açúcar do talhão m for colhida e transportada e o valor encontra-se limitado pela capacidade de moagem da usina.

$$\sum_{m=1}^M P^R A_m z_m \leq Q_{moa}^C \quad (26)$$

4.2.8 Restrições de Não-Negatividade

Em (27) tem-se o domínio de definição das variáveis de decisão do modelo.

$$\left\{ \begin{array}{l} x^e \geq 0 \\ x_i^c \geq 0, i \in \{1, 2, 3\} \\ x_{ij}^{cr} \geq 0, i \in \{1, 2, 3\}; j \in \{3, 4\} \\ x_{hj}^{er} \geq 0, h \in \{1, 2, 3\}; j \in \{1, 2\} \\ x_{3j}^{er} \geq 0, j \in \{1, 2\} \\ x_k \geq 0, k \in \{1, \dots, K\} \\ y_k \in \{0, 1\}, k \in \{1, \dots, K\} \\ z_m \in \{0, 1\}, m \in \{1, \dots, M\} \end{array} \right. \quad (27)$$

Em (28) tem-se o domínio de definição das variáveis auxiliares do modelo.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{ji}^{rc} \geq 0, j \in \{3,4\}; i \in \{1,2,3\} \\ x_{jh}^{re} \geq 0, j \in \{1,2\}; h \in \{1,2,3\} \\ x_{lh}^{re} \geq 0, h \in \{1,2,3\} \\ x_{2h}^{re} \geq 0, h \in \{1,2,3\} \\ q^c \geq 0 \\ d_h \geq 0, h \in \{1,2,3\} \end{array} \right. \quad (28)$$

4.2.9 Modelo Proposto

Em (29) temos o modelo para o PPCSC proposto neste trabalho.

$$\begin{aligned}
& \max \left(\sum_{i=1}^3 (P_i^C x_i^c) \right) + (P^E x^e) - \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (C_{ij}^C x_{ij}^{cr}) + \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^2 (C_{hj}^E x_{hj}^{er}) + \sum_{k=1}^K (C_k^F y_k) + \sum_{k=1}^K (C_k^T D_k x_k) + \sum_{m=1}^M C_m^M z_m \right) \\
& \left\{ \begin{aligned}
& \sum_{j=3}^4 x_{ij}^{cr} \geq D_i^C, i \in \{1,2,3\} \\
& \sum_{j=1}^2 x_{hj}^{er} \geq d_h, h \in \{1,2,3\} \\
& d_1 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (Q_{ij}^T x_{ij}^{cr}) \\
& d_2 = Q_{moa}^M q^c \\
& d_3 = (Q_{rec}^E + Q_{moa}^E) q^c + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (Q_{ij}^E x_{ij}^{cr}) + D_{aux}^E \\
& x_{ij}^{cr} = x_{ji}^{rc} \eta_{ji}^R, i \in \{1,2,3\}; j \in \{3,4\} \\
& x_{hj}^{er} = x_{jh}^{re} \eta_{jh}^R, h \in \{1,2,3\}; j \in \{1,2\} \\
& x_i^c = \sum_{j=3}^4 x_{ij}^{cr}, i \in \{1,2,3\} \\
& x^e = \sum_{j=1}^2 (x_{3j}^{er}) - d_3 \\
& \sum_{i=1}^3 x_{ji}^{rc} \leq Q_j^R q^c, j \in \{3,4\} \\
& \sum_{h=1}^3 x_{2h}^{re} \leq Q_2^R q^c \\
& \sum_{h=1}^3 x_{1h}^{re} \leq (Q_1^R q^c) + \sum_{k=1}^K x_k \\
& (Q_1^R q^c) + \sum_{k=1}^K x_k \leq P^Q \\
& \sum_{k=1}^K y_k \leq E_k^D \\
& x_k \leq Q_k^P y_k, k \in \{1,...,K\} \\
& \sum_{m=1}^M P^R A_m z_m \leq Q_{moa}^c \\
& x^e; q^c \geq 0 \\
& x_i^c; x_k; d_h \geq 0, i \in \{1,2,3\}; k \in \{1,...,K\}; h \in \{1,2,3\} \\
& x_{ij}^{cr}; x_{ji}^{rc} \geq 0, i \in \{1,2,3\}; j \in \{3,4\} \\
& x_{hj}^{er}; x_{jh}^{re} \geq 0, h \in \{1,2,3\}; j \in \{1,2\} \\
& y_k \in \{0,1\}, k \in \{1,...,K\} \\
& z_m \in \{0,1\}, m \in \{1,...,M\}
\end{aligned} \right.
\end{aligned} \tag{29}$$

No próximo capítulo são apresentados resultados numéricos obtidos com o modelo matemático de otimização para o PPCSC proposto neste trabalho.

5 TESTES NUMÉRICOS

O modelo proposto para o PPCSC foi implementado no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* e resolvido pelo solver CPLEX (IBM, 2021) versão 12.9.0. Para a validação do modelo considera-se uma planta hipotética com diferentes capacidades de moagem, que variam de 10 mil a 20 mil ton/dia. Segundo CONAB (2021b) plantas com capacidade de moagem de 20 mil ton/dia são consideradas plantas agroindustriais de grande porte.

Os parâmetros utilizados nos testes foram adotados conforme a literatura e podem ser vistos na Tabela 5.1 e no Apêndice A. Os preços de venda das *commodities* foram considerados na cotação de abril de 2021 segundo a CCEE (2021) e o CEPEA (2021a e 2021b) e são dados por: 2.083,00 R\$/ton para o açúcar VHP, 3.012,40 R\$/m³ para o etanol anidro, 2.674,70 R\$/m³ para o etanol hidratado e 226,73 R\$/MWh para a eletricidade excedente.

Tabela 5.1 - Parâmetros

Parâmetro	Referência	Parâmetro	Referência
P_i^C	CEPEA (2021ab)	Q_j^R	Lazzaretto et al. (2012)
P^E	CCEE (2021)	D_i^C	AGEITEC (2021b)
$C_{ij}^C, C_{hj}^E, D_{aux}^E$	Grisi (2010)	C_k^F, C_k^V	Cadavid et al. (2019)
$Q_{ij}^E, Q_{ij}^T, Q_{rec}^E$	Grisi (2010)	Q_k^P, D_k e E_k^D	Cadavid et al. (2019)
Q_{moa}^M, Q_{moa}^E	Grisi (2010)	P^Q	Mariani Filho (2006)
η_{ji}^R e η_{jh}^R	Grisi (2010)	C_{co}, C_{med}	Silva (2011)
P^R	COOPERCITRUS (2010)	C_m^M	Silva (2011)
Q_{moa}^C	Seabra (2008)	A_m e D_m^T	Silva(2011)

Fonte: Autor (2021)

Para realização dos testes numéricos consideram-se dois horizontes de planejamento, de 1 e de 7 dias de produção. Dentro do horizonte de planejamento de 1 dia foram realizados testes considerando 7 instâncias e as soluções obtidas serão comparadas entre si.

Os parâmetros que definem as demandas das *commodities* variam de 1.700 a 800 ton/dia para o açúcar VHP, 400 a 200 m³/dia para o etanol anidro e de 240 a 140 m³/dia para o etanol hidratado, a capacidade de processamento BRCM varia de 3.000 a 1.500

ton/dia e a capacidade de moagem da usina varia de 20 a 10 mil ton/dia. Os valores praticados no horizonte de planejamento de 1 dia para as 7 instâncias apresentam-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores adotados para os parâmetros – instâncias de 1 a 7 – horizonte de planejamento de 1 dia

Instância	Parâmetros				
	Q_{moa}^C (ton)	D_1^C (ton)	D_2^C (m ³)	D_3^C (m ³)	P^Q (ton)
1	20.000	1.700	400	240	3.000
2	19.000	1.615	380	228	2.850
3	18.000	1.500	370	216	2.700
4	17.000	1.400	350	230	2.550
5	16.000	1.300	320	230	2.400
6	15.000	1.275	300	180	2.250
7	10.000	800	200	140	1.500

Fonte: Autor (2021)

Para as 7 instâncias consideram-se 20 talhões com BRCM disponível para coleta e 16 talhões para colheita e transporte da cana-de-açúcar, de tamanhos diferentes e localizados a diferentes distâncias da usina.

Os parâmetros adotados na instância 1 foram retirados da literatura conforme Tabela 5.1, os demais dados, utilizados para as instâncias de 2 a 8 foram gerados de forma aleatória com base nestes valores.

Considerando o horizonte de planejamento de 7 dias foram realizados testes considerando uma nova instância (instância 8). Os valores praticados para este horizonte de planejamento estão presentes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores adotados para os parâmetros – instância 8 – horizonte de planejamento de 7 dias

Instância	Parâmetros				
	Q_{moa}^C (ton)	D_1^C (ton)	D_2^C (m ³)	D_3^C (m ³)	P^Q (ton)
8	140.000	10.000	3.000	2.400	21.000

Fonte: Autor (2021)

Dentro do horizonte de planejamento de 7 dias, consideram-se 50 talhões com BRCM disponível para coleta e 90 talhões para colheita e transporte da cana-de-açúcar, de tamanhos diferentes e localizados a diferentes distâncias da usina.

Em todas as instâncias considera-se o período de safra, também conhecido como

ano agrícola, que segundo Seabra (2008) corresponde a 200 dias compreendidos entre os meses de abril e novembro, na região sudeste brasileira, e o ciclo produtivo será estimado em 20 horas diárias;

Os custos considerados na função objetivo são referentes à etapa industrial, colheita e transporte da cana-de-açúcar e à etapa da cadeia de distribuição da BRCM. As despesas com matéria-prima, mão-de-obra, predial, plantio, estocagem entre outras não são consideradas na função objetivo. O Apêndice A disponibiliza os valores numéricos para os demais parâmetros adotados nos testes.

Para a implementação e testes numéricos realizados foi utilizado um computador com processador Intel® Core (TM) i5-7200U e 4,00 GB Random Access Memory (RAM) instalada. As soluções obtidas são apresentadas a seguir.

5.1 SOLUÇÕES OBTIDAS PARA AS INSTÂNCIAS COM HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DE 1 DIA

As instâncias de 1 a 7 possuem 104 variáveis (36 binárias e 68 contínuas) e 69 restrições lineares. A seguir serão detalhadas as soluções obtidas para a instância 1.

Na Tabela 5.4 tem-se as quantidades produzidas de cada *commodity* na solução obtida e o valor da função objetivo. O *mix* de produção (calculado pela razão entre o volume total de caldo processado pela usina e a quantidade destinada para a produção tanto de açúcar quanto de etanol) é igual a 69,45% (produção de açúcar) por 30,55% (produção de etanol) e tais porcentagens evidenciam um balanço produtivo esperado em uma usina com produção agregada de açúcar e etanol.

Pode-se perceber também que a produção de energia elétrica, além de atender as demandas internas da usina, ainda é capaz de produzir eletricidade excedente para ser vendida ao mercado, incidindo diretamente no aumento da receita da usina.

Tabela 5.4 - Quantidades produzidas de cada *commodity* e eletricidade excedente – instância 1

Balanço Econômico	6.404.867,85 R\$/dia
Quantidade de açúcar VHP produzida	1700,00 ton/dia
Quantidade de etanol anidro produzida	410,60 m³/dia
Quantidade de etanol hidratado produzida	240,00 m³/dia
Quantidade da eletricidade excedente produzida	17.511,00 MW/dia
Mix de produção	% 69,45/30,55

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 5.5 apresenta as quantidades produzidas de cada *commodity* a partir do caldo e do melaço. Esta tabela evidencia uma produção de açúcar e etanol anidro baseada integralmente na utilização do caldo. Já a produção de etanol hidratado utiliza tanto o recurso caldo quanto o melaço para sua produção. Nesta solução obtida, pode-se perceber que não foram produzidas as *commodities* açúcar VHP e etanol anidro a partir do recurso melaço em que o mesmo foi utilizado de forma integral na produção de etanol hidratado.

Tabela 5.5 - Quantidades produzidas de cada commodity a partir dos recursos - instância 1

Açúcar VHP produzida a partir do recurso caldo	1.700,00 ton/dia
Açúcar VHP produzida a partir do recurso melaço	0 ton/dia
Etanol anidro produzida a partir do recurso caldo	410,60 m ³ /dia
Etanol anidro produzida a partir do recurso melaço	0 m ³ /dia
Etanol hidratado produzida a partir do recurso caldo	73,40 m ³ /dia
Etanol hidratado produzida a partir do recurso melaço	166,40 m ³ /dia

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 5.6 tem-se as quantidades produzidas de cada tipo de energia a partir da BRCM e bagaço na solução obtida. Analisando a Tabela 5.6 é possível observar que o bagaço foi utilizado integralmente na produção de energia elétrica, enquanto a BRCM se dividiu na produção das três energias.

Tabela 5.6 - Quantidade produzida de cada energia a partir dos recursos - instância 1

Energia térmica produzida a partir do recurso BRCM	7.189,30 MW/dia
Energia térmica produzida a partir do recurso bagaço	0,00 MW/dia
Energia mecânica produzida a partir do recurso BRCM	220,00 MW/dia
Energia mecânica produzida a partir do recurso bagaço	0,00 MW/dia
Energia elétrica produzida a partir do recurso BRCM	4.350,70 MW/dia
Energia elétrica produzida a partir do recurso bagaço	13.608,00 MW/dia

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 5.7 são apresentadas as produções de energia para atendimento das demandas internas. Em uma escala decrescente, nota-se que a demanda interna de energia com menor necessidade de produção é a da energia mecânica, seguida da energia elétrica e, por último e com maior necessidade de geração, a energia térmica.

Tabela 5.7 - Produção de energia para atendimento das demandas internas - instância 1

Demanda de energia térmica necessária na usina	7.189,30 MW/dia
Demanda de energia mecânica necessária na usina	220,00 MW/dia
Demanda de energia elétrica necessária na usina	447,34 MW/dia

Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam como se dá a alocação dos recursos para a produção das *commodities*. Na Tabela 7.8, nota-se que o caldo foi destinado para produzir as três *commodities*, porém o melaço é utilizado em sua totalidade na produção da *commodity* etanol hidratado.

Tabela 5.8 - Quantidades necessárias dos recursos para produzir cada commodity - instância 1

Caldo necessário para produzir o açúcar VHP	10.000,00 ton/dia
Caldo necessário para produzir o etanol anidro	3.732,70 ton/dia
Caldo necessário para produzir o etanol hidratado	667,27 ton/dia
Melaço necessário para produzir o açúcar VHP	0 ton/dia
Melaço necessário para produzir o etanol anidro	0 ton/dia
Melaço necessário para produzir o etanol hidratado	340,00 ton/dia

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 5.9 confirma que a utilização da BRCM se divide na produção das três energias, enquanto a utilização do bagaço fica restrita à produção da energia elétrica.

Tabela 5.9 - Quantidades necessárias dos recursos para produzir cada energia - instância 1

BRCM necessária para produzir a energia térmica	1.732,40 ton/dia
BRCM necessária para produzir a energia mecânica	72,368 ton/dia
BRCM necessária para produzir a energia elétrica	1.195,30 ton/dia
Bagaço necessário para produzir a energia térmica	0,00 ton/dia
Bagaço necessário para produzir a energia mecânica	0,00 ton/dia
Bagaço necessário para produzir a energia elétrica	5.600,00 ton/dia

Fonte: O Autor (2021)

A Tabela 5.10 apresenta as quantidades da BRCM que devem ser coletadas em cada talhão. Dentre os 20 talhões disponíveis para coleta da BRCM, na solução obtida tem-se coleta em 7 deles, apenas no talhão 4 não ocorreu a coleta do total da BRCM disponível.

Tabela 5.10 – Talhões em que deve ocorrer a coleta da BRCM - instância 1

Talhão	Quantidade da BRCM disponível para coleta (em ton)	Quantidade da BRCM coletada (em ton)
2	30	30
4	39	25
5	26	26
6	35	35
9	21	21
13	27	27
16	36	36
Total	214	200

Fonte: O Autor (2021)

Por último na Tabela 5.11 apresenta-se a quantia total e quais talhões foram selecionados para que ocorra a colheita da cana-de-açúcar e transporte da mesma até a usina. Dentre os 16 talhões disponíveis para a colheita e transporte da cana, na solução obtida tem-se colheita e transporte em 11 deles. Destaca-se que isso não indica que a usina não irá colher a cana dos talhões não selecionados, e sim que esses talhões serão colhidos em outro dia de acordo com planejamento da usina a ser realizado. Ocorreu a colheita total da cana-de-açúcar disponível nos talhões.

Tabela 5.11 – Talhões em que deve ocorrer a colheita da cana-de-açúcar– instância 1

Talhão	Quantidade de cana disponível para colheita (ton)	Quantidade de cana que deve ser colhida (ton)
1	594,30	594,30
2	316,40	316,40
3	4.072,60	4.072,60
5	401,80	401,80
7	2.128,70	2.128,70
9	840,70	840,70
10	3.856,50	3.846,50
11	2.706,20	2.706,20
14	430,50	430,50
15	615,30	615,30
16	4.045,30	4.045,30
	19.998,30	$q^c = 19.998,30$

Fonte: O Autor (2021)

Diferentemente do que ocorreu com a seleção dos talhões para a coleta da BRCM, que considerou os talhões mais próximos, não foram consideradas na solução obtida as menores distâncias na seleção dos talhões para que ocorresse a colheita e transporte da cana, considerou-se a área dos talhões, logo, é preferível buscar em talhões mais distantes da usina, mas que possuam maiores quantidades de cana para serem colhidas e, assim, diminuir o número de talhões colhidos e beneficiar o balanço econômico da usina.

Os testes com as instâncias 2 a 7 foram realizados a fim de analisar o desempenho do modelo, quando se considera diferentes capacidades de moagem da usina e as alocações dos recursos da cana, sempre priorizando a produção da usina a fim de realizar o melhor balanço econômico. A Tabela 5.12 apresenta o comparativo entre as soluções obtidas nas 7 instâncias.

Tabela 5.12 – Comparativo das soluções obtidas para as instâncias de 1 a 7

Instância	Soluções Obtidas					
	FO (R\$)	x_1^c (ton)	x_2^c (m ³)	x_3^c (m ³)	x^e (MW)	<i>mix</i> (%)
1	6.404.867,85	1.700,00	410,60	240,00	17.511,00	69,45/30,55
2	6.086.413,26	1.615,00	289,96	228,00	16.635,00	69,45/30,55
3	5.769.803,81	1.500,00	388,94	216,00	15.778,00	68,08/31,92
4	5.441.711,12	1.400,00	351,90	230,00	14.911,00	67,29/32,71
5	5.119.611,11	1.300,00	329,05	230,00	14.044,00	66,39/33,61
6	4.807.138,21	1.275,00	307,91	180,00	13.133,00	69,45/30,55
7	3.204.718,39	800,00	217,61	140,00	8.785,20	65,36/34,64

Fonte: O Autor (2021)

Analisando as tabelas 5.2 e 5.12 nota-se que as demandas das *commodities* em todos os testes foram atendidas, gerando excedentes apenas nas produções do etanol anidro em todos os testes. Pode-se perceber também que o *mix* de produção entre as quantidades de açúcar produzido e de etanol foi equilibrado em todos os testes, o que é esperado de uma usina de produção mista, ocorrendo apenas pequenas oscilações para atender as demandas e tais mudanças ocorrem na realidade, pois as usinas precisam cumprir contratos de produção.

Apenas no teste com a instância 3 ocorreu a produção do etanol anidro, considerando a utilização tanto do recurso caldo, gerando 239 m³ de etanol quanto do melaço, 149,94 m³ de etanol, nos demais testes o melaço foi utilizado em sua totalidade na produção do etanol hidratado.

Em todos os testes a utilização da BRCM se manteve na produção das três energias, como já pôde ser observado nos resultados com a instância 1. O bagaço também foi usado integralmente na produção da energia elétrica em todas as instâncias. A maior demanda energética se manteve na utilização da energia térmica dentro da usina seguida da demanda elétrica e por último a demanda mecânica.

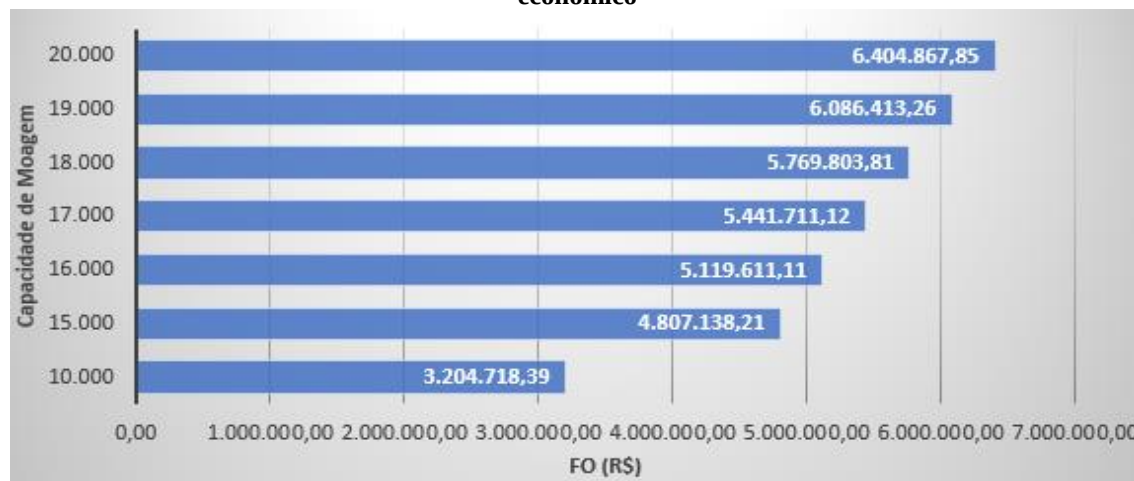
Em relação a seleção dos talhões para coleta da BRCM, nas instâncias 2 a 5 ocorreu coleta de 6 talhões, na instância 6 ocorreu a coleta de 5 talhões e na instância 7 ocorreu coleta de 4 talhões. Assim como na instância 1, a escolha dos talhões se deu pela menor distância dos mesmo em relação à usina favorecendo a FO.

A seleção de talhões para realização da colheita e transporte da cana-de-açúcar se deu da seguinte forma: 14 talhões escolhidos para a instância 2, 12 talhões para a instância 3, 11 talhões para a instância 4, 9 talhões para a instância 5, 13 talhões para a instância 6 e 8 talhões para a instância 7. Assim como na instância 1 o modelo não considerou as distâncias dos talhões selecionados para a colheita e sim as suas áreas, buscando sempre

colher dos talhões onde as áreas favoreciam da melhor forma o modelo para atender as demandas das *commodities* e consequentemente maximizar a FO.

O comparativo entre os valores encontrados para as soluções obtidas para as instâncias de 1 a 7 para o balanço econômico em relação as capacidades de moagem consideradas para cada instância, podem ser vistos na Figura 5.1

Figura 5.1 - Comparativo entre as capacidades de moagem e os valores obtidos para o balanço econômico



Fonte: O Autor (2021)

5.2 SOLUÇÃO OBTIDA PARA A INSTÂNCIA COM HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DE 7 DIAS

O modelo proposto para PPCSC para a instância 8 foi resolvido em 6 segundos e contou com 222 variáveis (140 binárias e 82 contínuas), 83 restrições lineares e 175 iterações.

A solução obtida para a instância 8 foi um balanço econômico de R\$ 44.858.866,92, com uma produção de 10 mil ton de açúcar VHP, 3.383,50 m³ de etanol anidro e 2.400,00 m³ de etanol hidratado. O *mix* de produção assume uma razão de 58,36% (produção de açúcar) por 41,64% (produção de etanol), tais porcentagens evidenciam um balanço produtivo esperado em uma usina com produção agregada de açúcar e etanol.

Observando a solução obtida nota-se que as demandas da usina são atendidas e assim como já visto em todos os testes realizados para as instâncias anteriores, apenas a produção da *commodity* etanol anidro gerou excedentes. O caldo foi alocado na produção do açúcar VHP e dos etanóis, enquanto o melaço foi utilizado integralmente na produção

do etanol hidratado. A BRCM se dividiu na produção das três energias enquanto o bagaço foi utilizado totalmente na produção de eletricidade.

Dentre os 50 talhões disponíveis para a coleta da BRCM, consideraram-se atraentes os 45 mais próximos ao centro de processamento dos quais foram coletadas um total de 1.400,20 toneladas de BRCM das 1.411,00 toneladas disponíveis para coleta, apenas no talhão 35 que tinha 38 toneladas de BRCM disponível para ser coletada, foram coletadas 27,196 ton. Já em relação aos talhões disponíveis para colheita e transporte da cana-de-açúcar, dentre os 90 disponíveis consideraram-se 83 deles atraentes para serem colhidos, e novamente consideraram-se os talhões com maiores áreas.

Pode-se concluir que os resultados apontam que o modelo desenvolve um importante papel na tomada de decisões pelos gestores das usinas sucroenergéticas, pois mostra sua eficiência na alocação ótima dos recursos envolvidos, redirecionando a BRCM na produção energética de maneira a beneficiar o *mix* da produção da usina e assim maximizar o balanço econômico.

O próximo capítulo apresenta as conclusões deste trabalho assim como as perspectivas de trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES

Para o setor de cogeração, a busca por alternativas que proporcionem noções de sustentabilidade é fundamental, pois seu papel ambiental está sendo discutido com mais afinco nos últimos tempos. A cogeração de energia, por meio da utilização da BRCM, ocasiona um conceito de agronegócio com base na diminuição dos efeitos poluentes advindos das produções sucroenergéticas em comparação à utilização de outras fontes de geração de energia e auxílio na preservação do meio ambiente.

Neste trabalho foi abordado um problema de planejamento de produção em uma usina sucroenergética, por meio da produção das *commodities* da cana-de-açúcar e da eletricidade excedente, realizando a seleção de talhões para colheita e transporte da cana e de talhões para coleta da BRCM, assim como a utilização desta BRCM na produção das *commodities* para maximizar o balanço econômico da usina.

O modelo PPCSC foi proposto com base em três outros modelos da literatura e, desta forma, construiu-se um modelo integrado cujo objetivo foi realizar uma alocação da BRCM, desde sua coleta nas lavouras até a sua redistribuição na etapa industrial do processamento da cana-de-açúcar, juntamente com os demais recursos oriundos da cana, assim como o bagaço, por exemplo, realizando o planejamento da produção da usina.

O modelo proposto para o PPCSC determina as quantidades das *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e hidratado e da eletricidade excedente que devem ser produzidas em função dos seus preços de comercialização. Restrições de demanda para cada *commodity* e demandas energéticas internas, restrições de capacidades de recursos, restrições de seleção de talhões para colheita da cana-de-açúcar e da coleta da BRCM foram consideradas no modelo.

As soluções obtidas por meio da implementação do modelo são promissoras, pois as mesmas mostram uma alocação dos recursos da cana de forma a priorizarem as produções das *commodities* que beneficiam a FO. Ainda em relação aos recursos, o modelo se mostra eficiente ao selecionar os talhões para realização da colheita e ao calcular as quantias necessárias da BRCM que devem ser coletadas nos talhões para que a usina possa cumprir com a produção sucroenergética dentro dos horizontes de planejamento.

Também é possível concluir que a alocação dos recursos se dá de forma a balancear as sinergias existentes nas produções de açúcar e etanol. Outra conclusão importante é que, na solução obtida, redireciona-se a utilização de todos os recursos

provisionados dentro do horizonte de planejamento, ou seja, além do atendimento das demandas das *commodities* serem atendidas, os produtos que maximizam a FO são produzidos até que os recursos disponíveis sejam mitigados.

O modelo matemático proposto, também determina a utilização da BRCM na produção conjunta das três energias, para atendimento das demandas internas e a sua utilização total na produção de energia excedente para ser vendida e maximizar diretamente as receitas da usina.

Como trabalhos futuros, propõem-se considerar restrições adicionais no modelo referentes à etapa do plantio, levando em conta as variedades da cana-de-açúcar que possam ser plantadas e da etapa de colheita em que podem ser consideradas a produtividade da cana e o desvio do pico de maturação na etapa de seleção dos talhões para colheita. Outros custos envolvidos no processo também podem ser considerados a fim de deixar o modelo mais completo. Além disso, propõe-se como trabalhos futuros, realizar testes numéricos com instâncias maiores e instâncias reais.

TRABALHOS PUBLICADOS

GARCIA, Daniel Fernando; SOLER, Edilaine Martins. Modelo de Otimização Aplicado ao Balanço Econômico da Cogeração de Energia, Produção de Etanol e Açúcar. In: **SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, 9., 2019, Bauru. *Anais...* Bauru: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2019.

GARCIA, Daniel Fernando; PARRAS, Isabela Garcia; SOLER, Edilaine Martins. Alocação Ótima da Biomassa de Cana-de-Açúcar para Produção de Etanol de Segunda Geração e Bioeletricidade: formação da carteira eficiente de produção. In: **SIMPÓSIO DE ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO**, 3., 2020. *Anais...* São Paulo: Universidade de São Paulo, Even3, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.29327/sengi2020.270773>

GARCIA, Daniel Fernando; SOLER, Edilaine Martins. Modelo de Otimização Aplicado ao Balanço Econômico da Cogeração da Bioenergia, Produção de Etanol e de Açúcar nas Usinas Sucroenergéticas. In: **SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, 10., 2020, Bauru. *Anais...* Bauru: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2020.

GARCIA, Daniel Fernando; PARRAS, Isabela Garcia; SOLER, Edilaine Martins. Alocação ótima da biomassa de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração e bioeletricidade: formação da carteira eficiente de produção. In: **Processos Químicos e Biotecnológicos**, v. 8, ed. 1. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2021, p. 30-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.29327/sengi2020.270773>

REFERÊNCIAS

- AGEITEC. Agência Embrapa de Informações Tecnológicas. **Árvore do Conhecimento: cana-de-açúcar – transporte**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_100_22122006154841.html>. Acesso em: 12 abr. 2021a.
- AGEITEC. Agência Embrapa de Informações Tecnológicas. **Árvore do Conhecimento: cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_109_22122006154841.html>. Acesso em: 12 abr. 2021b.
- AGROPÓS. **Cana-de-Açúcar: a cultura que potencializou o Brasil**. Disponível em: <<https://agropos.com.br/cana-de-acucar/>>. Acesso em: 06 jan. 2021.
- AGUSTINA, Fitri; VANANY, Iwan; SISWANTO, Nurhadi. **Biomass Supply Chain Design, Planning and Management: a review of literature**. In: 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, 2018. p. 884-888.
- ALPHA BRASIL. **Tipos de Açúcar**. Disponível em: <<https://noticiasalphabrasil19.wordpress.com/2016/01/18/tipos-de-acucar/>>. Acesso em: 05 jan. 2021.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa%282%29.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2021.
- ARAÚJO, Frederico Augusto Dantas. **Intensificação do Processo de Purificação do Caldo da Cana-de-Açúcar por Decantação Química e Adsorção**. 2017. 233f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2017.
- ASOCAÑA. **Sector Agroindustrial de la Caña: informe anual 2018–2019**. Disponível em: <<https://www.asocana.org/modules/documentos/vistadocumento.aspx?id=15331>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- BA, Birome Holo; PRINS, Christian; PRODHON, Caroline. Models for Optimization and Performance Evaluation of Biomass Supply Chains: an operations research perspective. **Renewable Energy**, v. 87, p. 977-989, 2016.
- BASSETTO, Nayara Zago. **SEPPA - Sistema Especialista para Planta de Produção de Etanol**. 2006. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Ampliação da Produção de Etanol e Cogeração de Energia**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/seminario/alcool_discussao.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2021.

CADAVID, Leonardo Rivera; VELÁSQUEZ, Pablo Cesar Manyoma; DUQUE, Diego Fernando Manotas. Supply Chain Optimization for Energy Cogeneration Using Sugarcane Crop Residues (SCR). *Sustainability*, v. 11, n. 23, p. 6565, 2019.

CALLE, Francisco Rosillo; BAJAY, Sergio Valdir.; ROTHMAN, Harry. **Industrial Uses of Biomass Energy: the exemple of Brazil**. Flórida: Editora CRC Press, 2000.

CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de Cana**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006.

CARPIO, Lucio Guido Tapia; SOUZA, Fábio Simone. Optimal Allocation of Sugarcane Bagasse for Producing Bioelectricity and Second-Generation Ethanol in Brazil: scenarios of cost reductions. *Renewable Energy*, v. 111, p. 771-780, 2017.

CARVAJAL, Jimmy; SARACHE, William; COSTA, Yasel. Addressing a Robust Decision in the Sugarcane Supply Chain: introduction of a new agricultural investment project in Colombia. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 157, p. 77-89, 2019.

CARVALHO, Marcelo Dias. **Proposta de um Modelo de Planejamento Agregado numa Usina de Açúcar e Etanol Vinculado à Flutuação de Preços em Mercados à Vista e no Mercado Futuro**. 2009. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARVALHO JUNIOR, Cícero Pereira. **Modelo de Otimização ao Balanço Econômico da Cogeração de Energia, Produção de Etanol e Açúcar na Indústria Canavieira**. 2016. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Preços Semanais Segundo a PLD 2021**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/preco_adm/precos/semanal/>. Acesso em: 11 abr. 2021.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Índice Semanal do Etanol Hidratado Combustível e Indicador Semanal do Etanol Anidro**. CEPEA/ESALQ São Paulo – 2021. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>>. Acesso em: 11 abr. 2021a.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Indicador Mensal do Açúcar VHP**. CEPEA/ESALQ – São Paulo 2021. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/acucar.aspx>>. Disponível em: 11 abr. 2021b.

CERVI, Walter Rossi; LAMPARELLI, Rubens Augusto Camargo; SEABRA, Joaquim Eugênio Abel; JUNGINGER, Martin; VAN DER HILST, Floor. Bioelectricity Potential from Ecologically Available Sugarcane Straw in Brazil: a spatially explicit assessment. *Biomass and Bioenergy*, v. 122, p. 391-399, 2019.

- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar| safra 2021/22 – 2º levantamento**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/38839_9d9e4e9b5f9c54c7d86d17f78f5bcf1d>. Acesso em: 07 set. 2021.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil: volume 5 – Safra 2011/2012**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/perfil-do-setor-sucroalcooleiro/item/download/23296_e8994bb0d8652261a47cf54ac4332120>. Acesso em 01 abr 2021b.
- COOPERCITRUS. Cooperativa de Produtores Rurais. **Irrigação em Cana-de-Açúcar Proporciona Alta Produtividade e Longevidade ao Canavial**. Disponível em: <<http://www.coopercitrus.com.br/?pag=revista&p=materia&codigo=6386>>. Acesso em: 01 jul. 2021.
- CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electro Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgard Olivares. **Biomassa para Energia**. Campinas: Unicamp, 2008.
- CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (Coord.). **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010. Vários Autores.
- COSTA, Caliane Bastos Borba; POTRICH, Erich; CRUZ, Antônio José Gonçalves. Multiobjective Optimization of a Sugarcane Biorefinery Involving Process and Environmental Aspects. **Renewable Energy**, v. 96, p. 1142-1152, 2016.
- COSTA, Eduardo Fabrício de Oliveira. **Perfil de Cana-Energia para Incrementar o Faturamento de Empresa Produtora de Etanol e Bioeletricidade**. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado Profissional de Energia da Biomassa) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.
- DANTAS, Djolse Nascimento. **Uso da Biomassa de Cana-de-Açúcar para Geração de Energia Elétrica: análise energética, exegética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. 2010. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- DE LIMA, Camila; BALBO, Antonio Roberto; HOMEM, Thiago Pedro Donadon; FLORENTINO, Helenice de Oliveira. A Hybrid Approach Combining Interior-Point and Branch-and-Bound Methods Applied to the Problem of Sugar Cane Waste. **Journal of the Operational Research Society**, v. 68, n. 2, p. 147-164, 2017.
- DE MEYER, Annelies; CATTRYSSSE, Dirk; RASINMÄKI, Jussi; VAN ORSHOVEN, Jos. Methods to Optimise the Design and Management of Biomass for Bioenergy Supply Chains: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 657-670, 2014.
- EDITORA VALETE. **Combustível para Consolidação**. Disponível em: <http://www.editoravalete.com.br/site_alcoolbras/edicoes/ed_116/mc_2.html>. Acesso em: 01 abr. 2021.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Queimadas na Colheita da Cana-de-Açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/878010/queimadas-na-colheita-da-cana-de-acucar-impactos-ambientais-sociais-e-economicos>>. Acesso em: 01 abr. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 06 abr. 2021.

GO, Alchris Woo; CONAG, Angelique; IGDON, Rose May; TOLEDO, Arjay; MALILA, Jayhiel. Potentials of Agricultural and Agrindustrial Crop Residues for the Displacement of Fossil Fuels: a Philippine context. **Energy Strategy Reviews**, v. 23, p. 100-113, 2019.

GO, Alchris Woo; CONAG, Angelique. Utilizing Sugarcane Leaves/Straws as Source of Bioenergy in the Philippines: a case in the Visayas Region. **Renewable Energy**, v. 132, p. 1230-1237, 2019.

GOVERNO. **Lei Nº 11.241, de 19 de setembro de 2002**. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11241-19.09.2002.html>>. Acesso em: 08/01/2021.

GRISI, Edson Fraga. **Gestión Óptima de la Operación de Industrias Sucroenergéticas en Mercados Eléctricos**. 2010. 290f. Tese (Doutorado em Energias Renováveis e Eficiência Energética) – Departamento de Energia Elétrica, University of Zaragoza, Zaragoza, 2010.

HERNÁNDEZ, Ulises Flores; JAEGER, Dirk; SAMPERIO, Jorge Islas. Bioenergy Potential and Utilization Costs for the Supply of Forest Woody Biomass for Energetic Use at a Regional Scale in Mexico. **Energies**, v. 10, n. 8, p. 1192, 2017.

HOLZHAUSEN, Hermann. **Sistemas de Colheita de Cana-de-Açúcar e Palha para a Produção de Etanol**. 2010. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso. FEMA – Fundação Educacional do Município de Assis. Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis. Assis-SP, 2010.

IANNONI, Ana Paula; MORABITO, Reinaldo. A Discrete Simulation Analysis of a Logistics Supply System. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 42, n. 3, p. 191-210, 2006.

IBM. International Business Machines. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio**. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/analytics/cplex-optimizer>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

IEA. Instituto de Economia Agrícola. **Protocolo Agroambiental do Setor sucroalcooleiro Paulista: ações visando à preservação ambiental**. Disponível em: <<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=12390>>. Acesso em: 01 abr. 2021

ISLER, Paulo Roberto; RAMOS, Romulo Pimentel, FLORENTINO; Helenice Oliveira; CANTANE, Daniela Renata. **Otimização Aplicada ao Planejamento de Plantio e Colheita da Cana-de-Açúcar Utilizando Graus-Dias**. In: XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, set. 16-19, 2014, Salvador/Bahia. 2014.

JUNQUEIRA, Rogério de Ávila Ribeiro; MORABITO, Reinaldo. Programação e Sequenciamento das Frentes de Colheita de Cana-de-Açúcar: modelo e métodos de solução para problemas de grande porte. **Gestão & Produção**, v. 25, n. 1, p. 132-147, 2018.

KHATIWADA, Dilip; LEDUC, Sylvain; SILVEIRA, Semida; MCCALLUM, Ian. Optimizing Ethanol and Bioelectricity Production in Sugarcane Biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, v. 85, p. 371-386, 2016.

LAMONICA, Hécio Martins. **Produção de Vapor e Eletricidade: a evolução do setor sucroalcooleiro**. In: CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. II GERA: Workshop de gestão de energia e resíduos na agroindústria sucroalcooleira. 2007.

LAMOUNIER, Wagner Moura; CAMPOS FILHO, Mario Ferreira; BRESSAN, Aureliano Angel. **Análise do Trade-Off na Produção de Açúcar e Etanol nas Usinas da Região Centro-Sul do Brasil**. In: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER), 44th Congress, July 23-27, 2006, Fortaleza, Ceará, Brazil. 2006.

LAZZARETTO, Andrea; MORANDIN, Matteo; TOFFOLO, Andrea. Methodological Aspects in Synthesis of Combined Sugar and Ethanol Production Plant. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 165-174, 2012.

LEDA, Victor Costa; GOLÇALVES, Aline Kuramoto; DA SILVA LIMA, Natalia. Sensoriamento Remoto Aplicado a Modelagem de Produtividade da Cultura da Cana-de-Açúcar. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 2, p. 263-270, 2019.

LUCON, Oswaldo dos Santos. **Aspectos Ambientais na Cadeia de Bicom bustíveis**. In: workshop “Aspectos ambientais da cadeia do etanol de cana-de-açúcar”. Projeto diretrizes de políticas públicas para a agroindústria canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo. 2008.

MACEDO, Isaias de Carvalho. **Geração de Energia Elétrica a Partir de Biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. Brasília: CGEE, 2001.

MARIANI FILHO, Luigi. **Utilização da Palha de Cana-de-Açúcar para Aumento da Capacidade Energética de Plantas de Utilidades**. 2006. 58f. Monografia (Bacharelado Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARQUES, Pedro Valentim. **Custo de Produção Agrícola e Industrial de Açúcar e Álcool no Brasil na Safra 2007/2008**. USP, ESALQ, Departamento de Economia, Administração e Sociologia, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas. Piracicaba, São Paulo, Brasil. (Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil), 2009.

MARTÍNEZ, Tamara León; RAMÍREZ, Daisy Dopico; HERNÁNDEZ, Omar Triana; ESTEVEZ, Marelys Medina. Paja de la Caña de Azúcar: sus usos en la actualidad. **ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar**, v. 47, n. 2, p. 13-22, 2013.

MATSUOKA, Sizuo; MACCHERONI, Walter; BRESSIANI, José Antônio; FOUTO, Ivo. Bioenergia da Cana. **Cana-de-Açúcar: bioenergia, açúcar e etanol**, v. 1, p. 548-576, 2012.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. **Agroindústria Canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

NOVA CANA. **A Produção de Cana-de-Açúcar no Brasil (e no mundo)**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo>>. Acesso em: 24 abr. 2021.

OBSERVATÓRIO DA CANA. **Histórico de Produção e Moagem**. Disponível em: <<https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn>>. Acesso em: 06 abr. 2021.

PAIVA, Rafael Piatti Oiticica; MORABITO, Reinaldo. Otimização do Planejamento Hierárquico da Produção em Usinas Cooperadas do Setor Sucroenergético. **Production**, v. 23, n. 3, p. 449-467, 2013.

PAULINO, Oscar Francisco Tribst. **Produção de Açúcar**. Curso de Pós-Graduação Gestão do Setor. Ufscar: São Carlos, 2009.

PDB. Portal do Biogás **Fabricação de Açúcar e Etanol a Partir da Cana-de-Açúcar**. Disponível em: <<https://www.portaldobiogás.com/fabricacao-de-acucar-e-etanol-partir-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 01 abr. 2021.

PEREIRA, Joana Portugal; SORIA, Rafael; RATHMANN, Régis; SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre. Agricultural and Agroindustrial Residues to Energy: techno-economic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 521-533, 2015.

PIEROSSI, Marcelo Almeida.; BERTOLANI, Fernando Cesar. Sugarcane Trash as Feedstock for Biorefineries: agricultural and logistics issues. In: Advances in sugarcane biorefinery. **Elsevier**, 2018. p. 17-39.

PIPPPO, Walfrido Alonso; LUENGO, Carlos Alberto; FELFLI, Feliz Eliecer Fonseca; GARZONE, Pietro; CORNACCHIA, Giancinto. Energy Recovery from Sugarcane Biomass Residues: challenges and opportunities of bio-oil production in the light of second-generation biofuels. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, n. 6, p. 063102, 2009.

POLTRONIERE, Sônia Cristina; ALIANO FILHO, Angelo; CAVERSAN, Amanda Suellen; BALBO, Antonio Roberto; FLORENTINO, Helenice de Oliveira. Integrated planning for planting and harvesting sugarcane and energy-cane for the production of sucrose and energy. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 105956, 2021.

REVISTA ALCOOLBRAS. Reportagem de Capa – Edição 90 de Março de 2005. **O Lixo para Fora**. Disponível em: <http://www.revistaalcoholbras.com.br/edicoes/ed_90/ed_90a.html>. Acesso em: 01 abr. 2021.

RIPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Biomassa de Cana-de-Açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica/edição dos autores, 2004.

ROMÃO JÚNIOR, Ricardo Agudo. **Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana-de-Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira**. 2009. 164f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009.

ROCHA, Quêssia de Noronha. **Gestão de Energia de Resíduos de Biomassa: otimização da distribuição geográfica das unidades industriais de geração de energia**. 2011. 97f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

RODRIGUES, Luiz Gustavo Scartezini. **Análise Energética de Diferentes Sistemas de Cogeração com Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2005. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2005.

SALGADO JUNIOR, Alexandre Pereira; CARLUCCI, Fabio Vogelaar; NOVI, Juliana. Aplicação da Análise Envoltória de Dados (AED) na Avaliação da Eficiência Operacional Relativa entre Usinas de Cana-de-Açúcar no Território Brasileiro. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 826-843, 2014.

SEABRA, Joaquim Eugênio Abel. **Avaliação Técnico-Econômica de Opções para o Aproveitamento Integral da Biomassa de Cana no Brasil**. 2008. 274f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SEGATO, Silvelena Vanzolini; PINTO, Alexandre de Sene; JENDIROBA, Eloísa; NÓBREGA, José Carlos Martins. **Atualização em Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Cadernos Planalsucar 2. 2006.

SHARMA, Bhavna; INGALLS, Ricki; JONES, Carol; KHANCHI, Amit. Biomass Supply Chain Design and Analysis: basis, overview, modeling, challenges, and future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 608-627, 2013.

SILVA, João Eduardo Azevedo Ramos da; ALVES, Maria Rita Pontes Assumpção; COSTA, Miguel Antonio Bueno da. Planejamento de Turnos de Trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 1, p. 73-90, 2011.

SILVA, Leandro Martins da. **Algoritmo Genético na Otimização do Custo de Colheita e Transporte da cana-de-açúcar**. 2011. 59f. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Botucatu, 2011.

SILVA, Aneirson Francisco; MARINS, Fernando Augusto Silva; MONTEVECHI, José Arnaldo Barra. **Tratamento da Incerteza no Planejamento da Colheita de Cana-de-Açúcar Utilizando um Modelo de Programação por Metas Multi-Escolha**. Revisado. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SBPO, Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa, Rio de Janeiro. 2012.

SINDHU, Raveendran; GNANSOUNOU, Edgard; BINOD, Parameswaran; PANDEY, Ashok. Bioconversion of Sugarcane Crop Residue for Value Added Products: an overview. **Renewable Energy**, v. 98, p. 203-215, 2016.

SOUZA, Fábio Simone de. **Alocação do Material Lignocelulósico no Setor Sucroenergético: formação da carteira eficiente de produção**. 2018. 158f. Tese (Doutorado em Planejamento energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SPADOTTO, Angélica Fernanda; FLORENTINO, Helenice de Oliveira. **Empacotamento do Palhiço da Cana-de-Açúcar**. In: 2006. XXIX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional; resumos. Campinas: 2006

TOLENTINO, Gilmar. **Programação Linear Inteira Aplicada ao Aproveitamento do Palhiço da Cana-de-Açúcar**. 2007. 70 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2007.

TOLENTINO, Gilmar. **Otimização Multiobjetivo para o Planejamento Integrado do Cultivo da Cana-de-Açúcar e da Cana-Energia Visando a Produção de Sacarose e Fibra**. 2021. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, São Paulo. Bauru, 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2004.

VEIC. **Biomass Energy Resource**. Disponível em: <<https://www.veic.org/>>. Acesso em: 24 abr. 2021.

WALTER, Arnaldo César da Silva. **Viabilidade e Perspectivas da Cogeração e da Geração Termoelétrica Junto ao Setor Sucroalcooleiro**. 1994. 283f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

YUE, Dajun; YOU, Fengqi; SNYDER, Seth. Biomass to Bioenergy and Biofuel Supply Chain Optimization: overview, key issues and challenges. **Computers & Chemical Engineering**, v. 66, p. 36-56, 2014.

APÊNDICE A – VALORES ADOTADOS PARA OS PARÂMETROS

Tabela 0.1 - Valores praticados nos testes numéricos

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
Q_{moa}^C	20000	ton/dia	η_{31}^R	0,17	ton/ton
P_1^C	2.083,00	R\$/ton	η_{32}^R	0,11	ton/m ³
P_2^C	3.012,40	R\$/m ³	η_{33}^R	0,11	ton/m ³
P_3^C	2.674,70	R\$/m ³	η_{41}^R	0,00	ton/m ³
P^E	226,73	R\$/MWh	η_{42}^R	0,49	ton/m ³
Q_1^R	0,14	ton/ton	η_{43}^R	0,49	ton/m ³
Q_2^R	0,28	ton/ton	η_{11}^R	4,15	ton/MWh
Q_3^R	0,72	ton/ton	η_{21}^R	2,24	ton/MWh
Q_4^R	0,017	ton / ton _{caldo}	η_{12}^R	3,04	ton/MWh
D_1^C	1.700,00	ton/dia	η_{22}^R	1,79	ton/MWh
D_2^C	400,00	m ³ /dia	η_{13}^R	3.64	ton/MWh
D_3^C	240,00	m ³ /dia	η_{23}^R	2,43	ton/MWh
C_{13}^C	1.017,50	R\$/ton	Q_{13}^T	2,94	MWh/ton
C_{14}^C	0,00	R\$/ton	Q_{23}^T	3,55	MWh/ton
C_{23}^C	1.369,61	R\$/m ³	Q_{14}^T	0,00	MWh/ton
C_{33}^C	1.369,61	R\$/m ³	Q_{24}^T	2,84	MWh/ton
C_{24}^C	287,83	R\$/m ³	Q_{33}^T	3,55	MWh/ton
C_{34}^C	287,83	R\$/m ³	Q_{34}^T	2,84	MWh/ton
C_{11}^E	27,06	R\$/MWh	Q_{moa}^M	0,011	MWh
C_{12}^E	27,06	R\$/MWh	Q_{rec}^E	0,007	MWh
C_{21}^E	54,11	R\$/MWh	Q_{moa}^E	0,011	MWh

Continuação da Tabela 0.1 - Valores praticados nos testes numéricos

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
C_{22}^E	0,00	R\$/MWh	D_{aux}^E	0,300	MWh
C_{31}^E	38,46	R\$/MWh	E_k^D	10	-
C_{32}^E	10,26	R\$/MWh	p^Q	3000.00	ton
Q_{13}^E	0,045	MWh/ton	D_{17}	22,30	Km
Q_{23}^E	0,018	MWh/ton	D_{18}	14,76	Km
Q_{14}^E	0,00	MWh/ton	D_{19}	22,49	Km
Q_{24}^E	0,011	MWh/ton	D_{20}	16,93	Km
Q_{33}^E	0,018	MWh/ton	Q_i^P	37	ton
Q_{34}^E	0,011	MWh/ton	Q_2^P	30	ton
C_k^F	178,21	R\$	Q_3^P	26	ton
C_k^T	0,64	R\$/(ton*Km)	Q_4^P	39	ton
D_1	17,14	Km	Q_5^P	26	ton
D_2	3,42	Km	Q_6^P	35	ton
D_3	21,16	Km	Q_7^P	37	ton
D_4	16,65	Km	Q_8^P	33	ton
D_5	3,24	Km	Q_9^P	21	ton
D_6	15,31	Km	Q_{10}^P	33	ton
D_7	22,56	Km	Q_{11}^P	33	ton
D_8	21,03	Km	Q_{12}^P	32	ton
D_9	5,55	Km	Q_{13}^P	27	ton
D_{10}	24,73	Km	Q_{14}^P	27	ton
D_{11}	17,78	Km	Q_{15}^P	30	ton

Continuação da Tabela 0.1 - Valores praticados nos testes numéricos					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
D_{12}	22,54	Km	Q_{16}^P	36	ton
D_{13}	11,12	Km	Q_{17}^P	24	ton
D_{14}	16,47	Km	Q_{18}^P	23	ton
D_{15}	22,67	Km	Q_{19}^P	30	ton
D_{16}	13,91	Km	Q_{20}^P	26	ton
C_1^M	279,37	R\$	A_1	8,49	ha
C_2^M	119,72	R\$	A_2	4,52	ha
C_3^M	6.617,02	R\$	A_3	58,18	ha
C_4^M	138,86	R\$	A_4	4,22	ha
C_5^M	155,71	R\$	A_5	5,74	ha
C_6^M	179,31	R\$	A_6	6,61	ha
C_7^M	3.312,21	R\$	A_7	30,41	ha
C_8^M	324,03	R\$	A_8	5,08	ha
C_9^M	838,55	R\$	A_9	12,01	ha
C_{10}^M	5.032,57	R\$	A_{10}	54,95	ha
C_{11}^M	4.483,81	R\$	A_{11}	38,66	ha
C_{12}^M	239,90	R\$	A_{12}	3,78	ha
C_{13}^M	631,81	R\$	A_{13}	10,43	ha
C_{14}^M	403,73	R\$	A_{14}	6,15	ha
C_{15}^M	219,27	R\$	A_{15}	8,79	ha
C_{16}^M	6.988,20	R\$	A_{16}	57,79	ha
P^R	70	ton/ha	C_{co}	10,50	R\$

Continuação da Tabela 0.1 - Valores praticados nos testes numéricos

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
C _{med}	6,42	R\$	-	-	-

Fonte: O Autor (2021)