

AMANDA SUELLEN CAVERSAN

MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DO
PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR E DA
CANA-ENERGIA

BAURU/SP

Outubro/2017

AMANDA SUELLEN CAVERSAN

MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DO
PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR E DA
CANA-ENERGIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia.

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Adj. Antonio Roberto Balbo

Co-Orientadora: Profa. Dra. Sônia Cristina Poltroniere Silva

BAURU/SP

Outubro/2017

Caversan, Amanda Suellen.

Modelo matemático para planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia / Amanda Suellen Caversan, 2017

57 f.

Orientador: Antonio Roberto Balbo

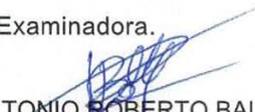
Co-orientadora: Sônia Cristina Poltroniere Silva

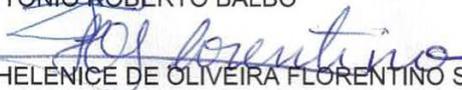
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

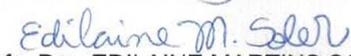
1. Cana-de-açúcar. 2. Cana - Energia. 3. Produtividade. 4. Produção. 5. Massa seca. 6. Modelo matemático I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE AMANDA SUELLEN CAVERSAN, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 30 dias do mês de outubro do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO - Orientador(a) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA do(a) Departamento de Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP, Profa. Dra. EDILAINE MARTINS SOLER do(a) Departamento de Matemática / UNESP / Câmpus de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de AMANDA SUELLEN CAVERSAN, intitulada **MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DO PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR E DA CANA-ENERGIA**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO


Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA


Profa. Dra. EDILAINE MARTINS SOLER

*Aos meus pais Edevaldo e Neuzeli,
Ao meu irmão João Pedro,
Pelo exemplo e apoio incondicional durante esse tempo de estudo,
Dedicado a vocês este trabalho.*

*“Não sei por quantas lutas irei passar, mas sei que nunca passarei sozinho.”
(Isaias 43:2)*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, por me abençoar com saúde, inteligência, paciência, perseverança, proteção e por colocar junto a mim uma família grande e maravilhosa e amigos poucos, mas verdadeiros.

Aos meus amados e admirados pais Edevaldo e Neuzeli e irmão João Pedro, que com humildade e amor sempre me apoiaram e incentivaram em todos os momentos de minha caminhada – sem vocês nada do que conquistei até hoje teria sido possível.

À minha avó Darci, pelo amor, carinho e cuidado de sempre, imprescindíveis à minha trajetória.

Aos meus queridos e amados avós Iraci, Joaquim e Hélio (*in memoriam*), que perdi ao longo desses últimos anos de estudo. Desde muito pequena, me incentivaram a sempre buscar pelos meus sonhos, a dar valor aos meus estudos e as pequenas grandes coisas da vida – levarei seus ensinamentos pelo o resto de minha vida.

À amiga Maria Laura, que sempre esteve presente durante todo esse tempo de estudo e caminhada, sempre me ajudando na pesquisa, estudo e na vida.

Às minhas primas e amigas Ana Flávia e Karoline, pela amizade e incentivo de sempre mesmo nesse tempo que passei mais distante.

Aos amigos Mariele, Danielle, Helen, Marina, Patrícia e Matheus, que levarei pelo resto de minha vida, vocês fizeram os dias mais difíceis e estressantes serem esquecidos pelos dias alegres, divertidos e festivos que passei ao lado de vocês.

Ao meu orientador Balbo e minha co-orientadora Sônia, pela oportunidade de aprendizado, pelo brilhante profissionalismo e dedicação ao trabalho, por acreditarem em mim, pela compreensão e preocupação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e professores, pela oportunidade única de realização deste curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela credibilidade e pelo auxílio financeiro.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

A cana-de-açúcar é matéria prima de destaque na produção de açúcar, etanol e energia. Isto é devido a grande demanda por estes produtos no Brasil e no mundo. Mas o problema atual é que a cana-de-açúcar atingiu uma extensa área agrícola e para o atendimento total da demanda desses produtos ainda é necessário maior extensão desta área, o que não é viável a países, como exemplo o Brasil, principalmente, devido a questões ambientais e de áreas destinadas ao plantio. Dessa forma, melhoristas estão desenvolvendo uma nova variedade de cana, a cana-energia, com a qual se espera suprir as necessidades de demanda que as variedades de cana-de-açúcar tradicionais não conseguem. Estima-se que a produção de etanol e energia a partir da cana-energia seja maior que a da cana-de-açúcar. Neste contexto, este trabalho traz uma proposta de planejamento otimizado, em que se utilizam as variedades de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e as variedades de cana-energia para a produção de etanol e energia, a partir de sua massa seca. Para isso neste trabalho apresenta-se um modelo matemático de otimização para o planejamento do plantio e da colheita das variedades de cana-de-açúcar e de cana-energia, que tem como objetivo maximizar a produção de sacarose e a produção energia. No modelo proposto são consideradas restrições técnicas de usinas sucroenergéticas de demandas mensais na produção de sacarose e massa seca, e de capacidade máxima mensal de moagem. Para a validação do modelo foi adaptada a inserção da variedade de cana-energia ao modelo proposto na literatura. Os resultados obtidos mostram o momento ideal para o plantio e para a colheita das variedades respeitando as demandas de produção e capacidade de moagem e a metodologia proposta tem potencial para auxiliar os gestores no gerenciamento das usinas sucroenergéticas.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Cana-energia, Produtividade, Produção, Sacarose, Massa seca, Modelo Matemático.

ABSTRACT

The sugarcane is an outstanding raw material for the production of sugar, ethanol and energy. This is due to the great demand for these products in Brazil and in the world. But the current problem is that sugar cane has reached an extensive agricultural area and, for the total attendance of the demand of these products, it is still necessary to extend this area, which is not feasible for countries, such as Brazil, due to, mainly, environmental questions and of harvesting demanded area. In this way, researchers are developing a new variety of sugarcane, the energy cane, to which is expected to attend the necessary demand that the traditional sugarcane varieties can not attend. It is estimated that the production of ethanol and energy from sugar cane is higher than sugarcane. In this context, this work presents a proposal for optimized planning, in which sugarcane varieties are used for the production of sugar and sugarcane varieties for the production of ethanol and energy, based on its biomass energy. For this purpose, a mathematical model of optimization will be presented for planting and harvesting sugarcane and energy varieties, whose objective is to maximize sucrose and energy production. In the proposed model are considered operational constraints of the mill and monthly demands attendance, in the sucrose and biomass energy production and maximum monthly milling capacity. For the validation of the model, it was adapted the insertion of the energy cane variety to the model proposed in the literature. The results show the ideal time for planting and harvesting the varieties, respecting the demands of production and milling capacity and the proposed methodology have potential to assist managers in the management of the mill.

Key words: Sugarcane, Energy Cane, Productivity, Production, Sucrose, Biomass Energy, Model Mathematical.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO	8
ABSTRACT.....	9
Introdução	1
Capítulo 1 Revisão Bibliográfica.....	5
Capítulo 2 A cana-de-açúcar e a cana-energia.....	9
2.1 Algumas comparações entre a cana-de-açúcar e cana-energia.....	11
2.2 Planejamento do plantio e da colheita.....	13
2.2.1 Plantio e colheita da cana-de-açúcar	13
2.2.2 Plantio e colheita da cana-energia.....	14
Capítulo 3 Problema de planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar e cana-energia 17	
Capítulo 4 Testes computacionais.....	25
4.1 Metodologia de Solução.....	25
4.2 Testes Computacionais.....	25
4.2.1 Dados para os Testes Computacionais	26
4.2.2 Resultados dos Testes Computacionais.....	29
Conclusões	40
Trabalhos apresentados e publicados	41
Bibliografia	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Variedades resultantes do cruzamento e seleção de espécies do complexo <i>Saccharum</i>	9
Figura 2.2: Diferença entre raízes da cana-energia e cana-de-açúcar.	10
Figura 2.3: Comparação entre produção de energia e produção etanol da cana-de-açúcar e cana-energia.	12
Figura 2.4: Comparação do padrão de raiz da cana-de-açúcar e da cana energia	15
Figura 3.1: Produtividade de uma variedade de cana-energia do 12º ao 60º mês.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparações Cana-de-açúcar e Cana-energia	11
Tabela 4.1: Dados das variedades de cana-de-açúcar	26
Tabela 4.2: Dados das variedades de cana-energia	27
Tabela 4.3: Dados de entrada para o teste	29
Tabela 4.4: Resultados das produções de sacarose e massa seca	29
Tabela 4.5 Resultado do planejamento de plantio e colheita da cana-energia para a I30.	31
Tabela 4.6: Resultado do planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar na I30.	32
Tabela 4.7: Resultado do planejamento para colheita na I40.	34
Tabela 4.8: Resultado do planejamento para colheita na I65.	35
Tabela 4.9: Resultado do planejamento para colheita na I80.	36
Tabela 4.10: Resultado do planejamento para colheita na I150.	37
Tabela 4.11: Resultado do planejamento para colheita na I300.	37
Tabela 4.12: Resultado do planejamento para colheita na I400.	38

Introdução

O Brasil é um país que apresenta considerável avanço na obtenção de energia elétrica através de fontes renováveis. Sendo um dos países mais ricos em recursos hídricos, a energia hidráulica sempre foi dominante (GOLDEMBERG & LUCON, 2007). Porém, nos últimos anos, devido aos períodos de seca terem se tornado mais frequentes, os níveis das bacias hidroelétricas se mostram mais baixos que os de costume, o que tem motivado a busca por novas fontes de energia renováveis.

Segundo dados fornecidos no Balanço Energético Nacional, Brasil (2016), houve mudanças na utilização da matriz energética brasileira nos anos de 2014 e 2015. A oferta hidráulica caiu de 407,2 TWh em 2014 para 394,2 TWh em 2015.

Mesmo com a queda da participação da matriz hidrelétrica, sua principal fonte renovável de energia, o Brasil participou da 21ª Conferência das Partes (COP21), ocorrida em dezembro de 2015, em Paris, em que junto a 195 países, comprometeu-se em aumentar o percentual de fontes renováveis em sua matriz energética.

De acordo com o documento publicado pelo Ministério do Meio Ambiente, (MMA, 2015), o plano brasileiro de redução do uso de fontes não renováveis proposto na COP21 foi o de aumentar seu percentual de participação de 41,2% em 2015 para 45% em 2030, reduzindo, assim, as taxas de emissões de gases do efeito estufa de 43% para 37% até 2025.

Para contribuir com as metas propostas neste plano, a matriz energética com grande potencial de crescimento no Brasil é a da biomassa, que é gerada a partir da decomposição de materiais orgânicos e está diretamente ligada às práticas industriais. Como exemplos dessas práticas temos a cogeração de eletricidade a partir do bagaço e do palhico da cana, provenientes da produção do açúcar e do etanol a partir da cana-de-açúcar, o carvão vegetal oriundo de plantações de eucaliptos e o uso da biomassa em indústrias de papel e celulose, (GOLDEMBERG & LUCON, 2007).

De acordo com Ripoli & Ripoli (2004), dentre todas as biomassas, a da cana-de-açúcar é a que possui maior poder calorífico, ganhando destaque o seu uso para a produção de energia pelas usinas sucroenergéticas.

Historicamente, em 2007 o Brasil já explorava esta fonte de energia quando foi realizado um leilão de energia exclusivo às fontes alternativas, tendo sido ofertadas termelétricas movidas a bagaço de cana (ANEEL, 2008). Outro leilão, ocorrido em 2008, foi caracterizado como primeiro leilão de energia de reserva, em que foi

contratada exclusivamente a energia elétrica produzida a partir da biomassa, sendo que a maior parte das usinas participantes tinham a pretensão de serem movidas pela biomassa de cana-de-açúcar.

O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, de acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar, (UNICA, 2017). É o maior produtor e exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol de acordo com (NOVACANA, 2013). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, Conab (2017), além de ter grande potencial na produção de etanol e de subprodutos como o açúcar, a cana tem sido vista como uma das melhores alternativas para a produção de biocombustíveis e cogeração de energia elétrica a partir de sua biomassa (bagaço e palhiço).

Segundo Matsuoka et al. (2016) a vantagem do cultivo da cana-de-açúcar está no fato de que, ao mesmo tempo em que ela produz açúcar e etanol para consumo interno e exportação, sua biomassa contribui para geração de energia. Os autores ressaltam que a cogeração de eletricidade a partir de sua biomassa trouxe maior destaque à cana-de-açúcar como uma produtora de energia elétrica, ou seja, ela não é mais vista apenas como produtora do tradicional açúcar, mas ganhou seu valor como matéria-prima alternativa energética.

Mesmo sendo um produtor canavieiro de destaque, atualmente o Brasil está passando por uma crise neste setor, (MARIANO, 2015). A UNICA, em conjunto com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e outros sindicatos e associações de produtores do Centro-Sul, apresentaram estimativa para a safra 2017/18 de cana-de-açúcar, apresentando uma projeção de moagem de 585,00 milhões de toneladas, (UNICA, 2016). Isso representa uma queda de 22,14 milhões de toneladas em relação aos 607,14 milhões de toneladas processados na safra anterior. Ainda de acordo com UNICA (2016), esta queda resulta da ligeira retração na área disponível para colheita e da diminuição esperada na produtividade agrícola do canavial a ser colhido no ciclo 2017/2018.

Observa-se, atualmente, que as variedades de cana-de-açúcar disponíveis já não atendem as necessidades de mercado. De acordo com Matsuoka et al. (2016), as variedades comerciais de cana-de-açúcar disponíveis no mercado têm as características de maior armazenamento de sacarose no colmo e de baixo teor de fibra, apresentando condição necessária para uma boa extração do caldo açucarado para a indústria. Porém, essa dualidade, alto teor de sacarose e baixo teor de fibra, foi sempre o ponto fraco das

variedades na visão dos melhoristas, pois, biologicamente, uma planta somente alcança maior potencial energético se for priorizada a fibra, e não a sacarose.

Desse modo, visando o melhoramento genético das variedades de cana-de-açúcar para atender as novas necessidades do mercado atual, está em experimento uma nova variedade de cana, denominada cana-energia. Segundo Matsuoka et al. (2016), esta nova variedade prioriza uma planta mais fotossintetizada para fibra, ou seja, com maior potencial energético, resultando em uma cana com alta capacidade produtiva, muito além do que se encontra nas variedades convencionais.

O objetivo deste trabalho de pesquisa é abordar o planejamento do plantio e da colheita desses dois tipos de variedades de cana, a tradicional cana-de-açúcar e a inovadora cana-energia, de forma conjunta e eficiente. Com isso, pretende-se unir a busca pelo aumento de produtividade de sacarose dos canaviais e o compromisso com a sustentabilidade na produção de energia elétrica. A proposta é obter um cultivo misto de cana-de-açúcar e cana-energia, a fim de que a primeira mantenha seu objetivo de geração de sacarose e a segunda auxilie na cogeração de energia elétrica a partir da sua matéria seca, que é composta pelas produtividades de sólidos solúveis (Brix) e de fibra presentes na variedade de cana.

Sendo assim, baseado nos trabalhos de Ramos (2014) e Souza (2017), propõe-se um modelo matemático para otimizar a produção de sacarose da plantação de cana-de-açúcar e a produção de massa seca, proveniente do cultivo de cana-energia, que será utilizada para cogeração de energia elétrica. Neste modelo, são consideradas restrições de atendimento da demanda mensal de sacarose e de massa seca, bem como restrições de campo e operacionais da usina. A modelagem considera duas tomadas de decisão: a primeira decisão é determinar qual variedade de cana-de-açúcar ou cana-energia deverá ser plantada em um determinado talhão e em que mês este plantio deverá acontecer. A segunda decisão consiste em determinar qual o mês de colheita da variedade plantada em cada talhão, de acordo com a produtividade de sacarose da cana-de-açúcar e a produtividade de massa seca da cana-energia, que são diferentes.

Testes numéricos com dados baseados em uma usina da região Centro-Sul do Brasil foram realizados para garantir atendimento de sua demanda mensal de açúcar e sua necessidade de geração de energia para seu auto sustento, optou por realizar o plantio misto de cana-de-açúcar e cana-energia. Resultados computacionais preliminares obtidos, utilizando-se o *solver* CPLEX, são apresentados e discutidos.

Ressalta-se que, a abordagem proposta neste trabalho considera apenas a

produção de energia a partir da massa seca proveniente do cultivo da cana-energia, pois o objetivo deste é conhecer melhor essa nova variedade de cana e ver como ela pode interagir com a produção de uma usina sucroenergética. A biomassa e a massa seca gerada pela cana-de-açúcar para a produção de energia serão consideradas em pesquisas futuras.

O trabalho está dividido e organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica da literatura, considerando trabalhos que têm aspectos similares e que serviram de base para o desenvolvimento do modelo aqui proposto. No Capítulo 2 é apresentada uma breve descrição sobre o ciclo de produção da cana-de-açúcar e da cana-energia, comparando as produtividades das variedades dos dois tipos. No Capítulo 3 é proposto um modelo matemático, referente à maximização da produção de sacarose da cana-de-açúcar e da produção de matéria seca. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, a partir destes. Seguido das conclusões finais, no Capítulo 5.

Capítulo 1 Revisão Bibliográfica

Este Capítulo contém uma revisão bibliográfica de trabalhos presentes na literatura e que foram utilizados como base para o desenvolvimento desse trabalho, por tratarem de modelos matemáticos que buscam a otimização de processos em usinas de cana-de-açúcar que sejam relacionados à custos, à produção e produtividade da cana-de-açúcar, à geração de energia elétrica a partir de sua biomassa.

No trabalho de Ripoli (1991) são destacadas a importância e eficiência do bagaço e do palhiço da cana-de-açúcar para a cogeração de energia. Neste trabalho é proposto um modelo que relaciona a quantidade de energia em forma de combustível que é consumida pelas máquinas envolvidas nas operações com a quantidade de energia existente nessa biomassa.

Entre outros pesquisadores que se dedicaram à pesquisa envolvendo o bagaço e o palhiço da cana de açúcar, Ripoli & Ripoli (2004) retrataram o funcionamento do setor sucroalcooleiro no Brasil: o histórico da colheita mecanizada, a queima de canaviais e implicações técnico-ambientais, os sistemas de recolhimento de palhiço, o potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na colheita e outros assuntos importantes para o setor. O livro apresenta a evolução e o desenvolvimento dos sistemas de colheita da biomassa da cana-de-açúcar, caracterizando-os, apontando suas consequências ambientais, com considerações sobre os sistemas de plantio e propostas metodológicas para ensaios padronizados de máquinas utilizadas em sistemas de colheita de cana-de-açúcar e de seu palhiço.

Florentino (2006) em seu trabalho desenvolveu modelos matemáticos com o objetivo de minimizar o custo de coleta e do transporte da biomassa residual da cana-de-açúcar e maximizar o balanço da energia dessa biomassa, e um modelo multiobjetivo visando atender ambos objetivos.

Tolentino (2007) utilizou o método *branch-and-bound* e investigou modelos matemáticos que determinam a melhor escolha para plantação em áreas agrícolas de uma usina dentre as variedades de cana-de-açúcar, que possam produzir palhiço a um mínimo custo de coleta e/ou ofereça um balanço ótimo de energia.

Lima (2009) investigou e utilizou técnicas de otimização para o processo de colheita do palhiço da cana-de-açúcar, propôs um modelo de otimização multiobjetivo de tomada de decisão para escolher as variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas a

fim de minimizar o custo da coleta e transporte do palhiço e maximizar o balanço de energia envolvido neste processo.

Homem (2010) investigou modelos matemáticos multiobjetivos que auxiliam nas escolhas de variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas em áreas mecanizáveis, com o objetivo de minimizar o custo de coleta da biomassa residual e maximizar o balanço de energia gerado neste processo. Para isto, ele utilizou um método híbrido de resolução: métodos de resolução de problemas multiobjetivos (soma ponderada e ϵ -restrito) associado ao método primal-dual de pontos interiores, para obter a solução ótima relaxada do modelo e o método *branch-and-bound*, que determinou a solução ótima inteira 0-1 relacionada às restrições de integralidade do problema.

Silva (2011) propõe um modelo matemático que seleciona o tipo de variedade que deve ser destinada ao plantio, a fim de se obter o menor custo no processo de colheita e transporte da cana-de-açúcar do canavial até a usina de destino. A solução foi obtida por Algoritmo Genético associado a este problema e os resultados obtidos foram comparados aos resultados obtidos pelo método *branch-and-bound*.

Florentino et al (2011) propuseram um modelo multiobjetivo de otimização e programação linear inteira para selecionar as variedades de cana-de-açúcar que devem ser plantadas a fim de minimizar custos na utilização de resíduos desse cultivo e maximizar o balanço energético envolvido nesse processo.

Homem, Balbo & Florentino (2011) propõem a utilização do método de ponto interior e do método *branch-and-bound* em modelos multiobjetivos de otimização relacionados à colheita da biomassa residual de cana-de-açúcar. Métodos estes que mostraram viabilidade dos modelos no auxílio da escolha das variedades de plantio de cana-de-açúcar, com o objetivo de reduzir o custo e aumentar o balanço energético da biomassa residual, os quais são conflitantes.

Lima (2013) investigou a resolução de problemas mono e multiobjetivos referentes à maximização do balanço de energia relativo ao aproveitamento da biomassa residual da cana-de-açúcar e minimização do custo de colheita da cana-de-açúcar e de sua biomassa residual, considerando áreas mecanizáveis e semimecanizáveis, através do desenvolvimento de métodos híbridos, envolvendo os métodos de otimização multiobjetivo, os métodos de pontos interiores e de programação inteira binária, que melhoraram o método desenvolvido por (HOMEM, 2010).

Ramos (2014) elabora em seu trabalho dois modelos de otimização que auxiliam no planejamento do plantio da cana-de-açúcar. Divide a metodologia proposta em duas

partes, sendo a primeira parte destinada ao planejamento ótimo da divisão da área de plantio em talhões, a fim de obter o máximo rendimento da máquina colhedora de cana-de-açúcar. Na segunda parte de seu trabalho preocupou-se com a escolha da variedade de cana-de-açúcar que deve ser plantada em cada talhão e determinar em qual mês do ano dever-se-ia fazer o plantio, utilizando-se do mesmo modelo proposto e de forma a maximizar a produção das variedades de cana-de-açúcar no total de quatro cortes. Para a validação do modelo, o autor propõe a implementação do modelo utilizando o algoritmo genético.

Nervis (2015) abordou o planejamento otimizado do período de colheita da cana-de-açúcar utilizando de uma metodologia que visa à maximização da produção de Pol (porcentagem em massa de sacarose aparente contida na cana-de-açúcar) e a produção de cana-de-açúcar, respeitando todas as restrições impostas pela usina. A validação do modelo foi realizado utilizando o Algoritmo Genético. Foram planejados os períodos de colheita dos talhões de uma unidade agrícola alcançando a máxima produção de sacarose em um planejamento de quatro anos.

Lima et al. (2016) propuseram uma nova abordagem de solução para o modelo multiobjetivo apresentado em Lima (2013), utilizando estratégias de resolução de problemas multiobjetivos: soma ponderada e ϵ -restrito, que transformam o problema em um conjunto de problemas mono-objetivos. Esta estratégia combinada com os métodos previsor-corretor primal-dual de pontos interiores e *branch-and-bound*, os quais foram implementados em linguagem de programação C++ e utilizados para determinar soluções eficientes (Pareto Ótimas) para o modelo citado.

Ramos et al. (2016), baseado no trabalho Ramos (2014), propõem um modelo matemático a fim de garantir que a colheita da variedade de cana-de-açúcar, já plantada em um determinado talhão, deva acontecer no seu período (mês) de maturação máxima (ou pico de maturação é o momento que a variedade atinge sua máxima produtividade), considerando a demanda mínima anual da produção de sacarose que uma usina necessita atingir para seu bom funcionamento. O modelo de otimização não-linear binário proposto pelos autores é resolvido pelo algoritmo genético proposto em (RAMOS, 2014).

A ideia do modelo proposto nesta dissertação teve início investigando-se o modelo proposto e resolvido em Ramos (2014), e principalmente adaptado por (SOUZA, 2017). Esse trabalho manteve o foco do trabalho de Souza (2017), em obter um planejamento otimizado das variedades tradicionais de cana-de-açúcar, de maneira

que sejam atendidas as demandas mensais de produção de sacarose determinada pela usina canavieira. Neste, foi acrescentado o planejamento de plantio e colheita de uma nova variedade de cana: a cana-energia. Esta, por sua vez, tem por objetivo garantir as demandas de produção de energia, através da utilização de sua matéria seca.

Para as duas variedades pensou-se em obter um planejamento ótimo que fornece a escolha das variedades que deverão ser plantadas, considerando a máxima produtividade de sacarose por hectare para as variedades de cana-de-açúcar e máxima produtividade de massa seca para as variedades de cana-energia. Para as suas respectivas colheitas foram considerados, respectivamente, o pico máximo de maturação para produtividade de sacarose e o pico de maturação para a produtividade de matéria seca, por hectare.

Um estudo e comparação sobre os dois tipos de variedades de cana, a cana-de-açúcar e a cana-energia, é realizado no Capítulo 2.

Capítulo 2 A cana-de-açúcar e a cana-energia

Estudos que buscam pelo melhoramento genético da cana visando a obtenção de mais fibra não são completamente inéditos, estes já foram realizados e tiveram êxito em países como Barbados, Índia, Cuba e Austrália no início dos anos de 1970 e no Brasil, também já foi explorado na década de 1980, época em que o mercado canavieiro dedicava sua atenção às variedades de cana que mais gerassem açúcar, (MARIANO, 2015). Porém, ainda de acordo com Mariano (2015), devido às necessidades atuais do mercado de bioeletricidade as usinas estão sendo obrigadas a se abrir para novos investimentos em cogeração, e estão criando condições para o desenvolvimento de matérias-primas ricas em biomassa.

As variedades de cana-de-açúcar plantadas em larga escala no Brasil são, atualmente, resultados de uma série de cruzamentos, que buscam por características predominantes da espécie botanicamente classificada como *Saccharum officinarum*, escolhida para a produção de açúcar, por possuir elevado teor de açúcar e baixa quantidade de fibra. Já as variedades de cana-energia tiveram seus cruzamentos direcionados para se obter um melhor aproveitamento das características da *Saccharum spontaneum*, espécie com alto teor de fibra, voltando a atenção para sua produtividade de massa seca, (MARIANO, 2015) e (MATSUOKA et al., 2014).

A Figura 2.1 compara os colmos da cana-de-açúcar selvagem (*Saccharum officinarum*) e da cana-de-açúcar tradicional (geneticamente modificada a partir da primeira e utilizada pela maioria das usinas), com os colmos da cana-energia selvagem (*Saccharum spontaneum*) e da cana-energia aprimorada (variedade em experimento e chamada de Tipo I-VIGNIS3).



Figura 2.1: Variedades resultantes do cruzamento e seleção de espécies do complexo *Saccharum*
Fonte: Mariano (2015)

As principais diferenças entre as duas espécies ocorrem devido aos caules subterrâneos chamados de rizomas. A variedade de cana-energia possui rizomas,

característica perdida nas variedades de cana-de-açúcar tradicionais. Segundo Mariano (2015), os rizomas, associados a um sistema radicular mais vigoroso, ou seja, com maior quantidade de raízes e raízes mais profundas, permite uma absorção muito maior de nutrientes do solo e a um nível mais acelerado. O resultado está em uma variedade de cana que brota mais rápido, mais próximas umas das outras e que possuem vida mais longa e maior produtividade. A Figura 2.2 mostra tais diferenças.

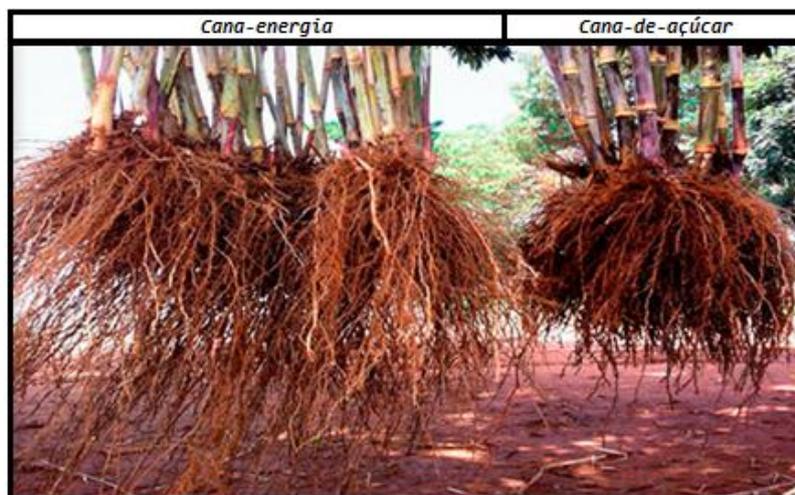


Figura 2.2: Diferença entre raízes da cana-energia e cana-de-açúcar.
Fonte: Matsuoka et al. (2014)

Além da diferença nas raízes, a cana-energia possui colmos (caules com nós salientes e folhas entre esses nós) mais finos e em maior quantidade do que a cana-de-açúcar. Matsuoka et al. (2010) descreve que por produzirem maior número de colmos, a cana-energia permite uma razão de multiplicação maior. Enquanto uma unidade da cana-energia produz 30 colmos (1:30) ou até mais, uma unidade de cana-de-açúcar produz 10 (1:10).

Para Matsuoka et al. (2010), uma das consequências em se produzir mais fibra do que açúcar está no fato de que essas plantas serão mais rústicas, trazendo muitas vantagens econômicas e ambientais. Por serem menos exigentes quanto ao tipo de solo, clima, água e nutrientes e mais resistentes a pragas e doenças, podem ser plantadas em áreas inadequadas para as plantações de cana-de-açúcar e alimentos, o que pode contribuir para contenção de erosões e no auxílio da recuperação de solos degradados, além de que para seu cultivo é necessária uma quantidade menor de fertilizantes e de defensivos, produtos agressivos ao meio ambiente.

Seguem comparações em que podemos notar a diferença entre as variedades cana-de-açúcar e cana-energia decorrentes das características de cada uma.

2.1 Algumas comparações entre a cana-de-açúcar e cana-energia

Nesta seção são destacadas algumas diferenças entre a cana-de-açúcar e a cana-energia, a partir de pesquisas que vêm sendo realizadas atualmente. A Tabela 2.1 apresenta comparação entre uma variedade de cana-de-açúcar e uma variedade de cana-energia (Tipo I-VIGNIS3) a partir de dados obtidos em (MARIANO, 2015).

Tabela 2.1: Comparações Cana-de-açúcar e Cana-energia

	CANA-DE-AÇÚCAR	CANA-ENERGIA Tipo I (vignis3)
CANA (Toneladas por hectare)	100	221
AÇÚCAR (kg de ATR por tonelada de cana)	135	115
AÇÚCAR (kg de ATR por hectare)	13.500	25.300
FIBRA (%)	12,5	17,9
BAGAÇO (Toneladas de cana por hectare)	25	79,1

Fonte: Mariano (2015)

Observa-se que a variedades de cana-energia apresentam maior produção de cana em toneladas por hectare do que a cana-de-açúcar. Essas variedades de cana produzem uma maior quantidade de colmos, quando comparamos com uma mesma área de plantação de variedade de cana-de-açúcar.

Uma característica da variedade de cana-energia é a quantidade de Açúcar Total Recuperável (ATR). O ATR representa a capacidade que uma variedade de cana tem em se converter em açúcar ou álcool. Enquanto a variedade de cana-de-açúcar apresenta 135 kg de ATR por tonelada de cana, a variedade de cana-energia apresenta 115 kg de ATR por tonelada de cana, respectivamente.

A porcentagem de fibra presente na variedade de cana-energia é consideravelmente maior que a porcentagem de fibra da variedade de cana-de-açúcar. Enquanto que a variedade de cana-de-açúcar tem em média 12,5% de fibra em sua composição, a variedade de cana-energia é composta por 17,9% de fibra. E é por essa característica que o atrativo da cana-energia está em sua produtividade de massa seca, que é composta por fibra e sólidos solúveis, sendo destinada a produção de energia, etanol e etanol de segunda geração.

Quanto à quantidade de bagaço, a cana-de-açúcar pode gerar 25 toneladas de por hectare, enquanto a variedade de cana-energia pode gerar 79,1 toneladas por hectare, ou

seja, uma variedade de cana energia pode gerar até três vezes mais bagaço que uma variedade de cana-de-açúcar.

Devido ao percentual mais significativo de fibra e produção de bagaço das variedades de cana-energia em comparação com a variedade de cana-de-açúcar considerada, tem-se também uma maior produção de álcool e energia a partir das variedades de cana-energia, como mostra a Figura 2.3. A cana-energia pode produzir até 14 milhões de litros de etanol por hectare a mais do que a cana-de-açúcar comum e até 206 megawatts de energia a mais.

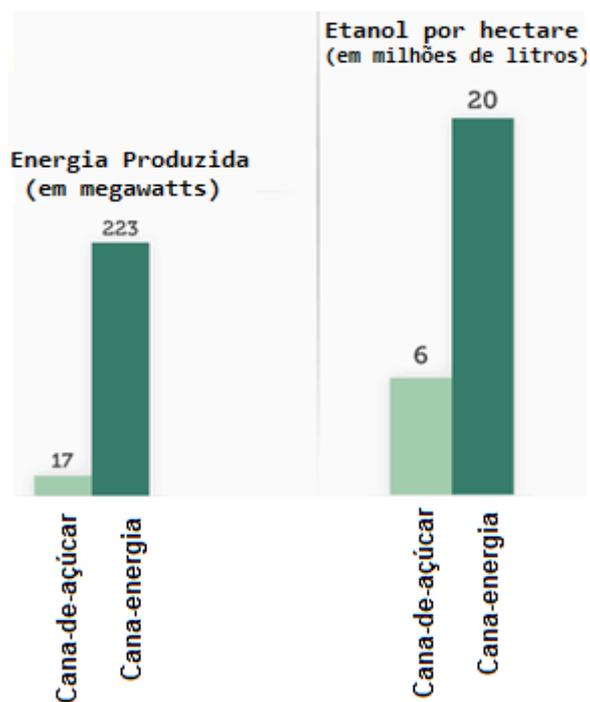


Figura 2.3: Comparação entre produção de energia e produção etanol da cana-de-açúcar e cana-energia.
Fonte: Mariano (2015)

De modo geral, a cana-energia supera a cana-de-açúcar em muitos aspectos, porém não se podem substituir totalmente as variedades de cana-de-açúcar presente no mercado pelas variedades de cana-energia, pois os estudos sobre o melhoramento genético da espécie e os testes dessas novas variedades de cana-energia ainda são muito recentes. Além disso, segundo Matsuoka et al. (2010), devido a uma maior concentração de fibra nos colmos nas variedades de cana-energia, os mecanismos que as indústrias utilizam hoje para converter os açúcares extraídos da cana-de-açúcar em açúcar para o consumo, não são capazes de transformar esses açúcares extraídos da cana-energia no açúcar comercializado atualmente. Dessa forma, a cana-energia ainda não tem sido considerada pelas usinas para a produção de açúcar, substituindo as variedades atuais, e sim como auxílio na produção de etanol e energia.

Sendo assim, é importante pensar em um plantio que contemple os dois tipos de cana, destinando a cana-de-açúcar para a geração de sacarose, a fim de produzir açúcar comercializável, e a cana-energia para a geração de massa seca para produção de energia elétrica, que pode tanto ser utilizada pela usina para o auto sustento de energia quanto para o comércio.

De acordo com Lima (2013), vários fatores interferem na produtividade da cana e, para se ter uma boa cultura, é preciso realizar um bom planejamento que se inicia no plantio e culmina na colheita das variedades. Sendo assim, para que esses dois tipos de cana atinjam de fato seus maiores índices de produção, é muito importante que se tenha um planejamento adequado do plantio e da colheita.

Seguem, na Seção 2.2, considerações importantes ao se planejar o plantio e a colheita tanto da cana-de-açúcar quanto da cana-energia.

2.2 Planejamento do plantio e da colheita

Seguem as características do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia que serão importantes na apresentação do modelo.

2.2.1 Plantio e colheita da cana-de-açúcar

O processo de plantio inicia-se com a escolha da variedade que será plantada nas áreas disponíveis para o cultivo (talhões), Florentino (2006) afirma que cada variedade de cana-de-açúcar possui um índice diferente de volume, produtividade de açúcar fermentescível, produtividade de fibra entre outros, e todas essas características devem ser consideradas a fim de que o plantio atinja sua melhor produção.

Matsuoka et al. (1998) afirmam que cada variedade de cana tem uma capacidade de adaptação específica de acordo com o ambiente em que ela é cultivada, adaptabilidade esta que não só corresponde ao ambiente: solo e clima, mas também a todas as condições que envolvem seu manejo, do plantio até a colheita. Por isso, tem-se necessidade constante de substituir uma variedade por outra mais produtiva e melhor adaptada. Além disso, é importante também procurar pela melhor época de plantio de cada variedade a ser escolhida.

Marchiori (2004), Rocha (1984) e Barbieri & Villa Nova (1977) afirmam que no Estado de São Paulo o período de plantio da cana-de-açúcar costuma ser mais longo, estendendo-se na maior parte do ano devido às condições climáticas favoráveis. O

plantio costuma ser realizado em duas épocas do ano: nos meses de setembro e outubro, que são plantadas as variedades de cana-de-açúcar conhecidas como cana de ano, chamadas assim, pois podem ser colhidas em 12 meses após o plantio; e nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril são plantadas as variedades de cana-de-açúcar chamadas de cana de ano e meio, pois podem ser colhidas após 18 meses do seu plantio.

Souza (2017) afirma que para que a produção esperada por uma usina seja a maior possível, as variedades de cana-de-açúcar plantadas devem ser colhidas em seu melhor momento de produtividade, ou seja, no momento em que a produtividade gerada por aquela variedade seja a máxima, este momento é chamado também de pico de maturação. O pico de maturação da cana de ano, se dá aos 12 meses após seu plantio e o pico máximo de maturação da cana de ano e meio aos 18 meses após o seu plantio.

Ainda segundo Souza (2017), embora seja importante, nem sempre é possível que uma usina colha todas as variedades plantadas no seu momento exato de maior maturação, pois a usina precisa atender demandas de produção durante todos os meses do ano, além de possuir também, limitações operacionais como delimitação na capacidade de moagem do maquinário. Desse modo, a autora propõe uma flexibilização na escolha do mês de colheita de cada talhão: três meses antes e três meses depois do pico máximo da variedade, consideração esta que foi mantida neste trabalho.

Segundo Rodolfo Jr (2015), que se baseou em Gascho & Shih (1983) e Bolonhezi & Pereira (1999), após o primeiro corte a cana-de-açúcar de ano e meio passa a ter um ciclo de colheita anual como a cana de ano. A cana que cresce para o segundo corte é chamada de cana-soca e é denominada ressoca nos demais cortes. É comum, que na lavoura, se tenha de três a seis colheitas consecutivas da variedade de cana-de-açúcar plantada, ou seja, é possível que se tenha até 5 socas (rebrotamento da cana que já foi cortada) das variedades de cana-de-açúcar. O que vai determinar a quantidade possível de cortes são fatores como o manejo do solo e de água, a variedade escolhida, clima, entre outros.

2.2.2 Plantio e colheita da cana-energia

Enquanto as variedades do tipo cana-de-açúcar tem maior concentração de sacarose em sua composição, a cana-energia é concentrada em fibra, sendo do interesse da indústria o aproveitamento de sua massa seca.

Devido a maior concentração de fibra em seus colmos, as canas do tipo cana-energia são variedades de plantas mais rústicas e, portanto, mais resistentes às condições adversas se comparadas com a cana convencional, possui técnicas de produção apuradas, sua colheita pode ser realizada durante um longo período do ano. De acordo com Evensen et al. (1997), a duração do crescimento da cana-energia pode variar de 9 a 36 meses, podendo produzir até 65 toneladas de massa seca por hectare, segundo (BAKKER, 1999).

Giamalva et al. (1984) e Alexander (1985) a que, se a colheita da cana-energia for realizada anualmente, a cada 12 meses, sua produtividade aumenta ou pelo menos se mantém estável nas próximas 6 ou 8 socas.

Estudos apontam que a cana energia pode ter ciclos produtivos de até 10 cortes sem redução na produção. Segundo Matsuoka et al. (2010), uma variedade de cana-energia pode ser cortada anualmente aumentando ainda mais sua produtividade. Isso ocorre, pois até a quarta soca a produtividade desse tipo de cana aumenta, mantendo-se constante até a sexta soca, só a partir daí é que começa a diminuir sua produtividade, mas ainda com o decréscimo esta variedade pode ser atrativa chegando até décima soca.

A Figura 2.5 apresenta um gráfico de Bischoff et al. (2008) fazendo um comparativo entre o padrão de raiz da cana-de-açúcar e da cana-energia. Neste gráfico podemos ver que enquanto o padrão de crescimento de uma variedade de cana-de-açúcar convencional decresce ao longo de 4 socas o da cana-energia aumenta até chegar na 4ª soca, o que garante que esta variedade ganhe em produtividade ou no mínimo se manter estável até a 6ª soca.

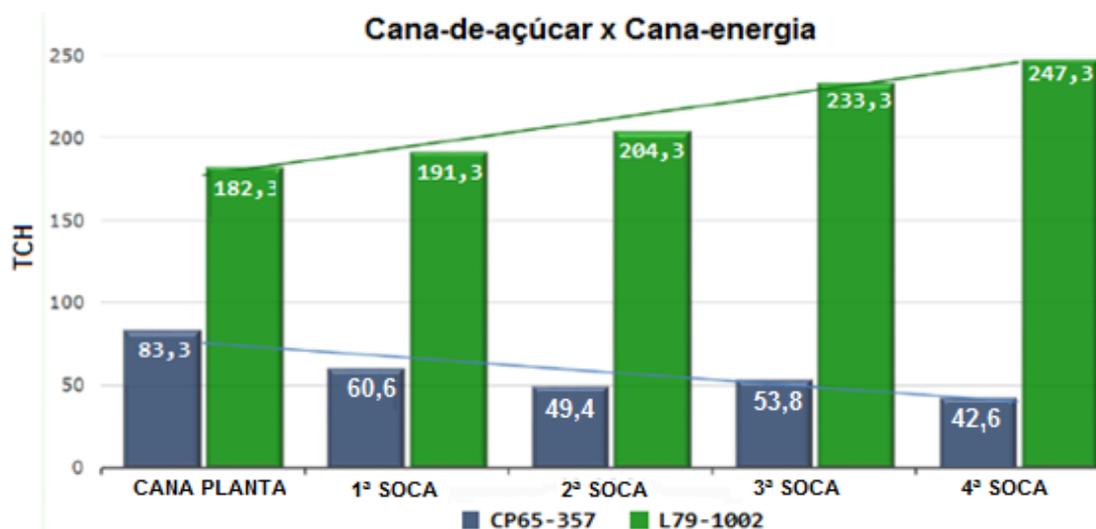


Figura 2.4: Comparação do padrão de raiz da cana-de-açúcar e da cana energia
Fonte: Bischoff et al. (2008)

Sendo assim, neste trabalho, foram utilizados os meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro para o plantio e considerado o tempo de um ano (12 meses) para a primeira colheita. Para a cana-energia foi considerada a mesma flexibilização para a colheita, 3 meses antes e 3 meses depois dos doze meses de plantio, porém aqui os 12 meses não se refere ao pico máximo de maturação em relação à produtividade de sacarose, mas sim a produtividade de massa seca da cana-energia no momento de colheita, uma vez que a produtividade de massa seca da cana-energia tende a aumentar enquanto ela ainda estiver no campo.

No Capítulo 3 será apresentado o modelo matemático proposto baseado em Souza (2017) e adaptado para incluir o plantio e a colheita da cana-energia, que para ser considerada no modelo foram necessárias alterações na sua função objetivo e em suas restrições.

Capítulo 3 Problema de planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar e cana-energia

3.1. Introdução

Um dos objetivos no planejamento da produção de cana em uma usina sucroenergética é o aumento da produtividade nos canaviais. Para atingir este objetivo, busca-se realizar um planejamento otimizado do plantio e da colheita da cana, possibilitando uma flexibilização no momento da colheita e respeitando-se as restrições de capacidade de processamento da usina e o atendimento da demanda mensal.

Neste Capítulo, propomos um modelo matemático, baseado em Ramos (2014) e Souza (2017), adaptado para um problema misto, que envolve tanto a produção de cana-de-açúcar tradicional, quanto a produção de um novo tipo de cana, denominada cana-energia. Foram acrescentadas restrições visando introduzir nesta nova abordagem as variedades de cana-energia para explorar sua produção de massa seca, utilizada para a geração de energia elétrica.

O modelo é composto por uma função objetivo, que visa maximizar a produção de sacarose, proveniente da cana-de-açúcar, e a produção de massa seca, proveniente da cana-energia. Tais produções são calculadas a partir de uma flexibilização no período da colheita da variedade de cana plantada, proposta por Souza (2017), buscando aumentar a produtividade de sacarose, obtida a partir do cultivo das variedades de cana-de-açúcar, e a produtividade de massa seca, a partir do cultivo das variedades de cana-energia. Além disso, deve-se considerar o atendimento das demandas mensais de sacarose e de massa seca da usina. A modelagem considera duas tomadas de decisão: a primeira consiste em determinar, para cada talhão, qual variedade de cana-de-açúcar ou cana-energia e em que período deve ser plantada. A segunda decisão é determinar qual o período de colheita da variedade plantada em cada talhão, de acordo com a produtividade de sacarose da cana-de-açúcar e a produtividade de massa seca da cana-energia, que são diferentes.

3.2. Modelo Matemático

Os índices, parâmetros, conjuntos e variáveis utilizados no modelo matemático proposto são definidos como segue.

Índices:

i : associado às variedades de cana-de-açúcar e de cana-energia;

j : associado aos talhões;

h : associado ao mês de plantio;

m : associado aos meses de colheita;

d : associado aos desvios do mês de pico de maturação da cana;

Parâmetros:

k_A : número de talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar;

k_E : número de talhões destinados ao plantio da cana-energia;

L_j : área do talhão j ;

P_{i0} : produtividade de sacarose da variedade i de cana-de-açúcar no primeiro corte;

E_{i0} : produtividade de massa seca da variedade i de cana-energia no primeiro corte;

P_{i1d} : produtividade de sacarose (tha^{-1}) da variedade i de cana-de-açúcar no seu primeiro corte, quando considerado o desvio d de seu pico de maturação;

E_{i1d} : produtividade de massa seca (tha^{-1}) da variedade i de cana-energia no seu primeiro corte, quando considerado o desvio d de seu pico de maturação;

Conjuntos:

$V_A = \{1, \dots, n_A\}$: conjunto das variedades de cana-de-açúcar;

$V_E = \{1, \dots, n_E\}$: conjunto das variedades de cana-energia;

$J_A = \{1, \dots, k_A\}$: conjunto dos talhões destinados ao plantio de cana-de-açúcar;

$J_E = \{1, \dots, k_E\}$: conjunto dos talhões destinados ao plantio de cana-energia;

H : conjunto de meses para o plantio da cana;

M : conjunto de meses para a colheita da cana;

I_1 : conjunto das variedades de cana-de-açúcar do tipo ano e meio;

I_2 : conjunto das variedades de cana-de-açúcar do tipo ano;

D_A : conjunto de possíveis desvios em relação ao pico de maturação da cana-de-açúcar;

D_E : conjunto de possíveis desvios em relação ao momento ideal de colheita para a cana-energia;

DP_m : demanda de sacarose, em toneladas, no mês m ;

DE_m : demanda de massa seca, em toneladas, no mês m ;

CM_m : capacidade de moagem de cana, em toneladas, no mês m .

Variáveis:

$$x_{ijh} = \begin{cases} 1, & \text{se a variedade } i \text{ será plantada no talhão } j \text{ no mês } h; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$t_{ijmd} = \begin{cases} 1, & \text{se a variedade } i \text{ plantada no talhão } j \text{ será colhida no mês } m \text{ com desvio } d; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O modelo para maximizar a produção de sacarose das variedades de cana-de-açúcar e a produção de massa seca a partir das variedades de cana-energia, está representado por (1) – (17):

$$\text{Maximizar } \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_A} P_{i1d} L_j t_{ijmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_E} E_{i1d} L_j t_{ijmd} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{h \in H} x_{ijh} = 1, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq 0,3k_A, \quad \forall i \in V_A \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J_E} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq 0,3k_E, \quad \forall i \in V_E \quad (4)$$

$$I0_j = \sum_{i \in V_A} \sum_{h \in H} i x_{ijh}, \quad \forall j \in J_A \quad (5)$$

$$I0_j = \sum_{i \in V_E} \sum_{h \in H} i x_{ijh}, \quad \forall j \in J_E \quad (6)$$

$$T0_j = \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{h \in H} h x_{ijh}, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (7)$$

$$I0_j = \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} i t_{ijmd} + \sum_{d \in D_E} i t_{ijmd} \right), \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} t_{ijmd} + \sum_{d \in D_E} t_{ijmd} \right) = 1, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (9)$$

$$TA1_j = T0_j + \sum_{i \in I_1} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_A} (18 + d)t_{ijmd} + \sum_{i \in I_2} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_A} (12 + d)t_{ijmd}, \quad (10)$$

$\forall j \in J_A$

$$TE1_j = T0_j + \sum_{i \in V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_E} (12 + d)t_{ijmd}, \quad \forall j \in J_E \quad (11)$$

$$T1_j = 12 + \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} mt_{ijmd} + \sum_{d \in D_E} mt_{ijmd} \right), \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D_A} P_{i1d} L_j t_{ijmd} \geq DP_m, \quad \forall m \in M \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D_E} E_{i1d} L_j t_{ijmd} \geq DE_m, \quad \forall m \in M \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D_A} F_1 P_{i1d} L_j t_{ijmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D_E} F_2 E_{i1d} L_j t_{ijmd} \leq CM_m, \quad (15)$$

$\forall m \in M$

$$x_{ijh} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in V_A \cup V_E, \forall j \in J_A \cup J_E, \forall h \in H \quad (16)$$

$$t_{ijmd} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in V_A \cup V_E, \forall j \in J_A \cup J_E, \forall m \in M, \forall d \in D_A \text{ ou } d \in D_E \quad (17)$$

A função objetivo (1) visa a maximização da produção de sacarose e da produção de massa seca para geração de energia elétrica. A sacarose é obtida a partir do cultivo da cana-de-açúcar, considerando a produtividade de sacarose de cada variedade $i \in V_A$, plantada em cada talhão $j \in J_A$ e colhida com desvio $d \in D_A$ em relação ao seu período de pico de maturação, ou seja, período em que ocorre a maior produtividade de sacarose. Para a produção de massa seca, considera-se apenas o cultivo da cana-energia, levando-se em conta a produtividade de massa seca de cada variedade $i \in V_E$, plantada em cada talhão $j \in J_E$ e colhida com desvio $d \in D_E$. No caso da cana-energia, o desvio é considerado em relação ao período de 12 meses após o plantio, podendo ocorrer anteriormente ou posteriormente.

A produtividade de sacarose tende a diminuir se a variedade de cana-de-açúcar for colhida antes ou depois do seu pico de maturação (12 meses após o plantio para cana de ano e 18 meses após o plantio para a cana de ano e meio). Dessa forma, para calcular

a produtividade de sacarose das variedades de cana-de-açúcar no primeiro corte considerando o desvio d , utiliza-se a equação (18), proposta por Nervis (2015) e também utilizada por (SOUZA, 2017).

$$P_{i1d} = (-0,0243d^2 + 1)P_{i0}, \quad \forall i \in V_A, \quad \forall d \in D_A \quad (18)$$

Observa-se que, para que a variedade de cana-de-açúcar atinja a melhor produtividade de sacarose, é ideal que a maioria das colheitas sejam realizadas com desvio igual a zero ou o mais próximo possível de zero. Conforme o período de colheita se distancia do período de pico de maturação da cana-de-açúcar, sua produtividade de sacarose decresce, prejudicando a produção final.

Para as variedades de cana-energia o desvio d pertence ao conjunto D_E de possíveis desvios para a colheita de acordo com o momento ideal de colheita dessas variedades, que costuma acontecer após 12 meses do seu plantio. Diferente do que ocorre com a produtividade de sacarose, a produtividade de massa seca tende a aumentar ao longo dos próximos cortes, com o crescimento da variedade de cana-energia.

Baseando-se nessa informação e com os dados da Figura 2.5, foi possível elaborar uma equação para determinar a produtividade de massa seca no momento da colheita no primeiro corte, levando em consideração o desvio de produtividade de massa seca de uma variedade de cana-energia.

A Figura 2.5 informa que, no primeiro corte (12 meses após seu plantio), a cana-energia atinge produtividade igual a 182,3 toneladas por hectare (tha^{-1}) de massa seca e no seu segundo corte (24 meses após seu plantio), atinge $191,3 \text{ tha}^{-1}$ de massa seca. Com esses dados, foi possível ajustar, de forma aproximada, uma função linear por partes que representa a produtividade de massa seca de uma variedade de cana-energia depois do primeiro corte e limitada pelo segundo corte, como apresenta a Figura 3.1, elaborada neste trabalho para representar essa situação.

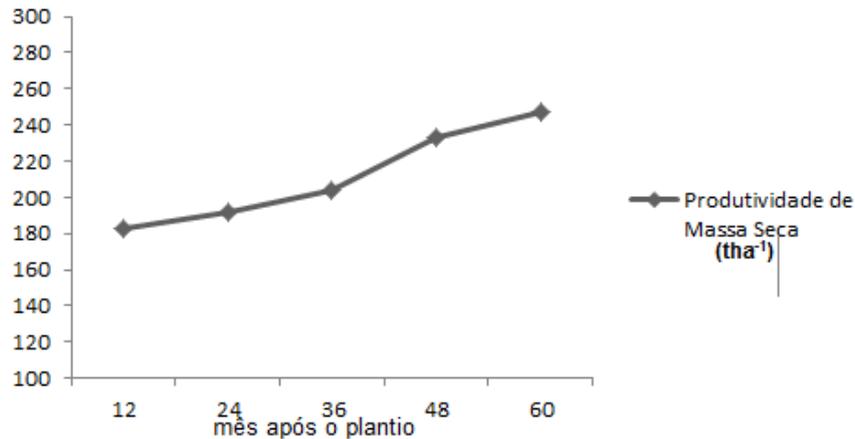


Figura 3.1: Produtividade de uma variedade de cana-energia do 12º ao 60º mês.

Pela Figura 3.1, observa-se um crescimento linear da produtividade de massa seca durante o período de 12 a 24 meses, sendo representado por um segmento de reta cujo coeficiente angular é igual a 0,75, o que significa que, a cada um mês a produtividade de massa seca da variedade de cana-energia irá aumentar $0,75 \text{ tha}^{-1}$, ou seja a taxa de crescimento mensal a cada um mês é de 0,41%.

Dessa forma a equação obtida para a produtividade de massa seca da variedade de cana-energia é expressa neste período por:

$$E_{i1d} = (0,0041d + 1)E_{i0} \quad \forall i \in V_E, \quad \forall d \in D_E \quad (19)$$

É possível representar a variação de produtividade de massa seca da variedade de cana-energia através de uma função linear por partes expressa para quatro períodos: 12 a 24 meses, 24 a 36 meses, 36 a 48 meses e 48 a 60 meses. Neste trabalho, como está sendo considerado apenas o primeiro corte desta variedade, a lei de produtividade utilizada é a expressa na equação (19).

Observa-se que, o primeiro corte da cana-energia é realizado 12 meses após o seu plantio. Como sua produtividade aumenta com o tempo, é possível colher após 12 meses e obter uma produtividade ainda maior. No entanto, outras restrições do canavial e da usina devem ser consideradas, como, por exemplo, sua demanda mensal, que deve ser atendida sem atrasos. Tais restrições são consideradas no modelo proposto, que permite que as variedades de cana-energia sejam colhidas após 12 meses, a partir do conjunto de desvios D_E .

O conjunto de restrições (2) garante que, em cada talhão j , seja plantada uma única variedade i de cana, no mês h com desvio d . Essa restrição evita que seja

escolhida mais de uma variedade de cana para ser plantada em um mesmo talhão em um mesmo período.

As restrições (3) garantem que cada variedade de cana-de-açúcar $i \in V_A$ seja plantada em, no máximo, 30% do total de talhões k_A destinados ao seu plantio. Este conjunto de restrições foi incorporado ao modelo para possibilitar que sejam escolhidas diferentes variedades para serem plantadas, evitando que doenças relacionadas a uma variedade ocorram em toda ou grande parte da plantação. Essas restrições foram utilizadas anteriormente por Souza (2017), baseada em Lima (2013), e é equivalente às utilizadas em Ramos (2014), que limita a área de talhão em que cada variedade poderá ser plantada. Com o mesmo intuito, as restrições (4) garantem que cada variedade $i \in V_E$ de cana-energia seja plantada em, no máximo, 30% do total de talhões k_E destinados ao seu plantio.

Em (5), $I0_j$ define a variedade de cana-de-açúcar $i \in V_A$ selecionada para ser plantada no talhão $j \in J_A$ no mês de plantio h . Analogamente, nas equações (6), $I0_j$ representa a variedade de cana-energia $i \in V_E$ selecionada a ser plantada no talhão $j \in J_E$ no mês de plantio h .

Nas equações (7), $T0_j$ define o mês h em que ocorrerá o plantio no talhão j , seja ele destinado ao plantio de cana-de-açúcar ou cana-energia.

As equações (8) asseguram que a variedade $i \in V_A \cup V_E$ a ser colhida no talhão $j \in J_A \cup J_E$ no mês de colheita m com desvio de colheita d seja a mesma que foi plantada no mês h .

O conjunto de restrições (9) garante que a variedade $i \in V_A \cup V_E$ plantada no talhão $j \in J_A \cup J_E$ tenha uma única colheita anual, ou seja, garante que um talhão seja escolhido para colheita apenas uma vez no ano.

Nas equações (10), $TA1_j$ define quantos meses após o plantio no talhão $j \in J_A$ será realizada a colheita. A colheita ocorrerá após 18 meses de seu plantio, considerando um desvio $d \in D_A$, para as variedades de cana-de-açúcar do tipo cana de ano e meio $i \in I_1$, ou após 12 meses de seu plantio, com desvio d , para as variedades de cana-de-açúcar do tipo cana de ano $i \in I_2$. Da mesma forma, nas equações (11), $TE1_j$ define quantos meses após o plantio no talhão $j \in J_E$ será realizada a colheita. Neste caso, a colheita de cana-energia ocorrerá após 12 meses de seu plantio, com desvio $d \in D_E$.

As equações (12) identificam o mês do ano, $T1_j$, em que será feita a colheita no

talhão j , a partir do tempo $TA1_j$ ou $TE1_j$, que é a idade (em meses) da cana plantada no talhão j .

As restrições (13) e (14) referem-se ao atendimento da demanda mensal de sacarose e de massa seca em toneladas, respectivamente.

As restrições (15) garantem que a capacidade mensal de moagem de cana (em toneladas) seja atendida. Segundo Matsuoka et al. (2010), as variedades tradicionais de cana-de-açúcar possuem de 10 a 15% de sacarose em sua composição. Já a cana-energia, baseado em dados de três variedades, apresenta em torno de 37,5% de massa seca (fibra + sólidos solúveis) em sua composição. Logo, nas restrições (15), F_1 é um fator de conversão da produção de sacarose em quantidade de cana-de-açúcar necessária para ser processada. Da mesma forma, F_2 é um fator de conversão da produção de massa seca em quantidade de cana-energia. Nesse trabalho, consideramos a média de 12,5% de sacarose na cana-de-açúcar e de 37,5% de massa seca na cana-energia. Assim, os fatores F_1 e F_2 foram calculados da seguinte forma:

$$F_1 = \frac{100}{12,5} = 8 \quad \text{e} \quad F_2 = \frac{100}{37,5} = 2,67;$$

As restrições (16) e (17) definem o domínio das variáveis de decisão do modelo.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para a resolução do modelo proposto, bem como os resultados obtidos em testes computacionais.

Capítulo 4 Testes computacionais

Neste Capítulo serão apresentados os testes computacionais realizados para a validação do modelo discutido no Capítulo anterior. Para a implementação do modelo, foi utilizada a implementação desenvolvida no trabalho de Souza (2017), adaptada para receber as novas informações referentes às variedades do tipo cana-energia e à capacidade de moagem de cana.

São apresentados os dados utilizados para os testes computacionais, os seus resultados obtidos e discussões em relação a essas soluções.

4.1 Metodologia de Solução

Utilizou-se o *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* no ambiente de programação OPL, a fim de resolver o modelo proposto.

Para validar o modelo apresentado neste trabalho, foi simulado o problema de uma usina que tem foco na produção de sacarose a partir da cana-de-açúcar para gerar o açúcar destinado ao comércio e energia elétrica para seu autossustento. Assim, considerou-se que uma usina mescla em seu plantio variedades de cana-energia, assim, a plantação de cana-de-açúcar será destinada à produção de sacarose e a plantação de cana-energia à produção de energia.

Foram realizados testes computacionais, para analisar o modelo, o qual obteve solução eficiente, pois foram determinadas as variedades de cana-de-açúcar e de cana-energia que possuem maior produtividade. Em relação à colheita, o tempo em relação aos desvios selecionados para a colheita de cada variedade acontecem de acordo com o melhor período para cada variedade, a cana-de-açúcar foi colhida, em sua maioria, com desvio zero e a cana-energia foi colhida com desvio 3, em sua maioria, em todos os testes. Além de garantir que as demandas mensais para as produções de sacarose e de massa seca e capacidade máxima de moagem de cana fossem atendidas.

Os testes estão descritos em mais detalhes nas seções seguintes, em que também são apresentados os dados utilizados e a discussão dos resultados obtidos.

4.2 Testes Computacionais

Os testes computacionais foram realizados para 8 instâncias, utilizando o *software* CPLEX, em um computador com processador *Intel Core i5-2450M*, 2.50GHz

e 4.0 GB de memória RAM, sistema operacional de 64 Bits. A seguir são descritas as informações referentes às instâncias testadas.

4.2.1 Dados para os Testes Computacionais

Para todas as 8 instâncias geradas foram utilizados dados reais de 20 variedades de cana-de-açúcar, destas, sendo 6 variedades de canas de ano e 14 de canas de ano e meio, e 5 variedades do tipo cana-energia, totalizando em 25 variedades de cana.

Os dados com relação à produtividade de sacarose, em toneladas por hectare (tha^{-1}) de cada variedade de cana-de-açúcar estão descritos na Tabela 4.1, dados estes, obtidos do trabalho de (NERVIS, 2015). As variedades i de 1 a 6 são variedades de cana-de-açúcar do tipo cana de ano e as variedades i de 7 a 20 são as do tipo cana de ano e meio:

Tabela 4.1: Dados das variedades de cana-de-açúcar

i	VARIEDADE	PRODUTIVIDADE DE SACAROSE (tha^{-1})
1	CTC 15	132,80
2	RB855453	121,93
3	RB85755	137,90
4	RB925211	89,29
5	SP80-3280	121,70
6	SP81-3250	140,60
7	CTC 2	129,10
8	CTC 4	130,90
9	CTC 9	100,00
10	CTC 17	112,30
11	CTC 20	165,00
12	RB855156	117,80
13	RB86755	148,20
14	RB928062	113,00
15	RB966928	123,10
16	RB922579	142,40
17	RB855453	133,35
18	SP80-1842	112,80
19	SP83-2847	126,70
20	CTC 6	136,00

Fonte: Nervis (2015)

A Tabela 4.2 apresenta os dados relacionados à produtividade de massa seca em toneladas por hectare de cada variedade de cana-energia, os quais se encontram no trabalho de (MATSUOKA et al., 2010). As variedades i de 1 a 5 são todas variedades de cana-energia.

Tabela 4.2: Dados das variedades de cana-energia

i	PRODUTIVIDADE DE MASSA SECA (tha^{-1})
1	236
2	215
3	200
4	181
5	179

Fonte: Matsuoka et al. (2015)

Foi considerado que o foco de produção da usina teste é a sacarose, considerando que a produção de massa seca (para produzir energia) é realizada para suprir a necessidade de consumo da usina, podendo comercializar apenas o excedente. Então, são destinados sempre o maior número de talhões para a plantação das variedades de cana-de-açúcar. Em todas as instâncias geradas os talhões possuem área que variam aleatoriamente entre 20, 25 e 30 hectares.

As possibilidades de meses para o plantio e para a colheita também foram as mesmas em todas as instâncias e foram escolhidas baseadas na prática de cultivo da cana na Região Centro-sul do Brasil. Dessa forma, os meses para a escolha do plantio estão em um conjunto composto com 6 elementos: $H=\{1, 2, 3, 4, 9, 10\}$, em que os números correspondem aos meses do ano, 1 corresponde ao mês de janeiro, 2 corresponde ao mês de fevereiro, 3 corresponde ao mês de março, 4 corresponde ao mês de abril, 9 corresponde ao mês de setembro e 10 corresponde ao mês de outubro. Sendo que, para a plantação das variedades de cana-energia foram considerados todos os elementos do conjunto H ; para as variedades de cana-de-açúcar do tipo cana de ano e meio foram considerados apenas os elementos $\{1, 2, 3, 4\}$, pois para esse tipo de cana o plantio ocorre apenas nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, e para as variedades de cana-de-açúcar do tipo cana de ano foram considerados apenas os elementos $\{9, 10\}$, pois para esse tipo de cana o plantio deve ocorrer apenas nos meses de setembro e outubro, como visto no Capítulo 2.

Os desvios que possibilitam que as variedades de cana, sejam colhidas antes ou depois do seu tempo ideal (12 ou 18 meses após o plantio) a fim de atender a demanda mensal da usina e a capacidade de moagem de cana foram divididos em dois conjuntos, um para atender a função de produção de sacarose a partir das variedades de cana-de-açúcar, denominada de D_A e o outro para atender a função de produção de massa seca proveniente das variedades de cana-energia, denominada de D_E , sendo $D_A = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ e $D_E = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$. Os desvios também permaneceram os mesmos para todas as instâncias.

O conjunto M de meses destinados à colheita das variedades de cana também foi fixo para todas as instâncias, tal que é definido por $M = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$, em que 4 se refere ao mês de abril, 5 se refere ao mês de maio, 6 se refere ao mês de junho, 7 se refere ao mês de julho, 8 se refere ao mês de agosto, 9 se refere ao mês de setembro, 10 se refere ao mês de outubro e 11 se refere ao mês de novembro, meses estes destinados a safra (período de colheita) na região Centro-sul.

Outro dado que permaneceu fixo em todas as instâncias foram os valores de capacidade de moagem de cana que fazem parte do conjunto DM_m . Baseados em dados de usinas canavieiras de porte médio da região Centro-sul, estipulou-se que a média de capacidade máxima de moagem de cana é de 300.000 toneladas de cana moída por mês. Dessa forma, o conjunto de capacidade mensal de moagem de cana foi definido para todas as instâncias por $DM_m = 300.000$, tal que $m \in M$.

Pensou-se em um problema que fosse satisfazer uma usina cujo foco principal é a produção de sacarose, e que buscou plantar as variedades de cana-energia para suprir as necessidades de abastecimento de energia elétrica para seu autossustento. Desse modo, em todas as instâncias foram destinados maior número de talhões para a plantação das variedades de cana-de-açúcar. A área dos talhões variam aleatoriamente entre 20, 25 e 30 hectares e o número de talhões variam em cada instância como podemos ver na Tabela 4.3, em que a instância I30 possui 30 talhões, a instância I40 possui 40 talhões, a instância I65 com 65 talhões, a instância I80 com 80 talhões, I150 com 150 talhões, I300 com 300 talhões, I400 com 400 talhões e I500 com 500 talhões.

Os dados referentes ao conjunto de demanda mensal de produção de sacarose DP_m , $m \in M$, foram baseados em Souza (2017) e variam de acordo com o número de talhões nas instâncias. Assim, como variam os dados relativos as demandas mensais de energia DE_m , $m \in M$, dados estes baseados no consumo mensal de uma usina de porte médio da região Centro-sul. Ambos em toneladas.

Na Tabela 4.3 é possível encontrar estes e os dados que variam para cada instância.

Tabela 4.3: Dados de entrada para o teste

INS-TÂN-CIA	Nº DE TALHÕES			DEMANDAS MENSAIS (t)	
	Energia	Açúcar	Total	Sacarose	Massa seca
I30	10	20	30	{5000, 5000, 5000, 6000, 6000, 6000, 5000, 5000}	{500, 5000, 500, 500, 500, 500, 500, 500}
I40	10	30	40	{7000, 7000, 7000, 8000, 8000, 8000, 7000, 7000}	{700, 7000, 700, 700, 700, 700, 700, 700}
I65	15	50	65	{10000, 10000, 10000, 11000, 11000, 11000, 10000, 10000}	{1100, 1100, 1100, 1100, 1100, 1100, 1100, 1100}
I80	20	60	80	{12000, 12000, 12000, 13000, 13000, 13000, 12000, 12000}	{1200, 1200, 1200, 1200, 1200, 1200, 1200, 1200}
I150	25	125	150	{17000, 17000, 17000, 18000, 18000, 18000, 17000, 17000}	{1700, 1700, 1700, 1700, 1700, 1700, 1700, 1700}
I300	50	250	300	{20000, 20000, 20000, 21000, 21000, 21000, 20000, 20000}	{2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000}
I400	100	300	400	{25000, 25000, 25000, 26000, 26000, 26000, 25000, 25000}	{2500, 2500, 2500, 2500, 2500, 2500, 2500, 2500}
I500	100	400	600	{30000, 30000, 30000, 31000, 31000, 31000, 30000, 30000}	{3000, 3000, 3000, 3000, 3000, 3000, 3000, 3000}

4.2.2 Resultados dos Testes Computacionais

Os resultados dos testes computacionais realizados estão apresentados na Tabela 4.4, em que estão definidos os valores obtidos para a produção de sacarose e a produção de massa seca e o tempo computacional que o *solver* utilizou para resolver o problema para cada instância.

Tabela 4.4: Resultados das produções de sacarose e massa seca

INSTÂNCIA	PRODUÇÃO (t)			TEMPO (min)
	SACAROSE	MASSA SECA	TOTAL	
I30	74.543,93	53.478,948	128.022,878	00:25:73
I40	110.969,037	53.478,948	161.342,085	00:57:94
I65	185.041,39	83.123,81	268.165,2	1:19:76
I80	223.939,013	107.121,137	331.060,15	05:01:93
I150	470.231,47	133.136,06	603.367,53	08:58:29
I300	946.171,921	267.888,496	1.214.060,417	28:12:76
I400	1.344.898,48	380.779,457	1.725.677,937	42:38:40
I500		---		01:29:88

Observa-se que, o teste computacional realizado para a instância I500, não determinou uma solução ótima para esta instância, após aproximadamente 1:30 minutos de execução do *solver* CPLEX, devido a capacidade insuficiente de memória do programa. Em instâncias com número maior ou igual a 500 talhões, são objetos de pesquisa futura.

As instâncias com pequeno número de talhões, I30, I40, I65 e I80 resolveram o problema com tempo computacional relativamente pequeno. A partir da I150, o programa começou a levar um pouco mais tempo para a resolução, e começa a apresentar dificuldade e maior demora na obtenção da solução na instância I300, sendo impossível de resolver a partir da instância I500, devido ao grande número de variáveis o programa escolhido não tem mais capacidade para buscar por uma solução.

Será discutido aqui, os resultados e planejamento detalhados obtidos na I30. Os resultados obtidos para o planejamento das demais instâncias são apenas comentados resumidamente, apresentado a porcentagem de talhões colhidos de acordo com seu tempo de crescimento após o plantio com base nos desvios de colheita.

Analisando os resultados da Instância I30 na Tabela 4.4 vemos que em um intervalo de tempo pequeno foi obtida a solução para o problema. A produção total é de 128.022,878 toneladas, sendo que 20 talhões com plantações de variedades de cana-de-açúcar com áreas variadas renderam uma produção de sacarose igual a 74.543,93 toneladas e 10 talhões de plantações de variedades de cana-energia com áreas variadas, renderam produção de massa seca igual a 53.478,948 toneladas. Ou seja, nessa instância 58,2% da produção é de sacarose e 41,7% da produção é de massa seca.

Produzindo esse total de 53.478,948 toneladas de massa seca, e considerando que, de acordo com a demanda de energia da usina, esta precisaria apenas de 4000 toneladas de massa seca no ano para seu consumo próprio, dessa forma, a usina teria disponível 49478,95 toneladas de massa seca no ano que podem ser utilizadas para o comércio em mercados de energia.

A Tabela 4.5 mostra o planejamento do plantio e da colheita das variedades de cana-energia na instância I30. Nela podemos ver qual é a variedade i de cana-energia selecionada para ser plantada em cada talhão j , o mês h escolhido para plantação e o mês m escolhido para a colheita. Também foram indicados os desvios d de escolha do mês de colheita dessa variedade com relação aos 12 meses após seu plantio e a área, em hectares, do talhão j .

Tabela 4.5 Resultado do planejamento de plantio e colheita da cana-energia para a I30.

TALHÃO	ÁREA	VARIEDADE	MÊS <i>h</i>	MÊS <i>m</i>	DESVIO
<i>j</i>	(<i>ha</i>)	<i>i</i>	PLANTIO	COLHEITA	<i>d</i>
1	20	3	9	11	2
2	25	2	1	4	3
3	30	1	3	6	3
4	20	3	9	10	1
5	25	2	1	4	3
6	30	1	1	4	3
7	20	4	9	8	-1
8	25	2	4	7	3
9	30	1	2	5	3
10	20	3	9	9	0

Da Tabela 4.5 observa-se que foram escolhidas 4 dentre as 5 variedades de cana-energia disponíveis, sendo essas as 4 mais produtivas. As variedades escolhidas foram plantadas da seguinte maneira com relação aos talhões:

- Variedade 1: plantada nos talhões de número 3, 6 e 9 de 30 hectares cada,
- Variedade 2: plantada nos talhões de número 2, 5 e 8 de 25 hectares cada,
- Variedade 3: plantada nos talhões de número 1, 4 e 10 de 20 hectares cada,
- Variedade 4: plantada no talhão de número 7 de 20 hectares.

Os meses escolhidos para o plantio das variedades de cana-energia foram bem distribuídos entre os talhões, sendo que:

- Janeiro – serão plantadas as variedades correspondentes aos talhões 2, 5 e 6;
- Fevereiro – será plantada a variedade correspondente ao talhão 9;
- Março – será plantada a variedade correspondente ao talhão 3;
- Abril – será plantada a variedade correspondente ao talhão 8;
- Setembro – serão plantadas as variedades correspondentes aos talhões 1, 4, 7 e 10.

A colheita das variedades de cana-energia ocorre 12 meses após o seu plantio, podendo ser colhida um pouco antes ou um pouco depois de acordo com o desvio *d*, dessa forma, foi obtido que:

- Abril – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 2, 5 e 6, todas com desvio de colheita igual a 3, ou seja, 15 meses após o plantio;
- Maio – será colhida a variedade correspondente ao talhão 9, com desvio igual a 3;
- Junho – será colhida a variedade correspondente ao talhão 3, com desvio 3;
- Julho – será colhida a variedade correspondente ao talhão 8, com desvio igual a 3;
- Agosto – será colhida a variedade correspondente ao talhão 7, com desvio igual a -1, ou seja, será colhido com 11 meses após seu plantio;

- Setembro – será colhida a variedade correspondente ao talhão 10, com desvio igual a zero, exatamente 12 meses após seu plantio;
- Outubro – será colhida a variedade correspondente ao talhão 4; com desvio 1, ou seja, 13 meses após o seu plantio;
- Novembro – será colhida a variedade correspondente ao talhão 1, com desvio igual a 2, 14 meses após seu plantio;

Dessa forma, como é colhido, pelo menos, um talhão no mês, significa que a demanda de massa seca será atendida.

A Tabela 4.6 mostra o planejamento de plantio e colheita das variedades de cana-de-açúcar na instância I30. Ela mostra qual variedade i de cana-de-açúcar selecionada para ser plantada em cada talhão j , o mês h escolhido para plantação e o mês m escolhido para a colheita. Também foram indicados os desvios d da escolha do mês de colheita dessa variedade com relação ao seu pico de maturação, assim como a área em hectares do talhão j .

Tabela 4.6: Resultado do planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar na I30.

TALHÃO j	ÁREA (ha)	VARIEDADE i	MÊS h PLANTIO	MÊS m COLHEITA	DESVIO d
1	25	13	4	10	0
2	30	11	1	7	0
3	20	6	10	11	1
4	25	16	1	6	-1
5	30	11	1	7	0
6	20	16	1	5	-2
7	25	13	2	8	0
8	30	11	3	9	0
9	20	16	1	6	-1
10	25	13	2	8	0
11	30	11	1	7	0
12	20	6	10	11	1
13	25	16	1	4	-3
14	30	11	1	10	0
15	20	16	1	5	-2
16	25	13	2	8	0
17	30	13	2	8	0
18	20	16	1	4	-3
19	25	13	1	7	0
20	30	11	3	9	0

A Tabela 4.6 mostra que das 25 variedades de cana-de-açúcar foram escolhidas apenas 5 para o plantio, dentre as quais tem-se uma variedade de cana de ano, variedade 6, a ser plantada em dois talhões de 20 hectares, dentre as quais tem-se:

- Uma variedade de cana de ano plantada em dois talhões de 20 hectares cada:

- Variedade 6: plantada nos talhões de número 3 e 12 de 20 hectares cada;
- Três variedades de cana de ano e meio plantadas nos seguintes talhões com suas respectivas áreas:
 - Variedade 11: plantada nos talhões de número 2, 5, 8, 11, 14 e 20 de 30 hectares cada;
 - Variedade 13: plantada nos talhões de número 1, 7, 10, 16 e 19 de 25 hectares cada e no talhão 17 de 30 hectares;
 - Variedade 16: plantada nos talhões de número 4, 9, 15 e 18 de 20 hectares cada e nos talhões 6 e 13 de 25 hectares cada.

Da mesma forma que as escolhas feitas para a cana-energia, as variedades de cana-de-açúcar escolhidas são as mais produtivas.

Nessa instância, I30, os meses escolhidos para o plantio das variedades de cana-de-açúcar foram distribuídos entre os talhões da seguinte maneira:

- Janeiro – serão plantadas as variedades correspondentes aos talhões 2, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 18 e 19;
- Fevereiro – serão plantadas as variedades correspondentes aos talhões 7, 10, 16 e 17;
- Março – serão plantadas as variedades correspondentes aos talhões 8 e 20;
- Abril – será plantada a variedade correspondente ao talhão 1;
- Outubro – serão plantadas as variedades correspondentes aos talhões 3 e 12.

A colheita da cana-de-açúcar na I30 está bem distribuída e atenderá a demanda mensal de sacarose. A colheita será realizada na seguinte ordem:

- Abril – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 13 e 18, com desvio igual a -3, ou seja, 9 meses após seu plantio;
- Maio – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 6 e 15, com desvio igual a -2, ou seja, 10 meses após seu plantio;
- Junho – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 4 e 9, com desvio igual a -1, ou seja, 11 meses após seu plantio;
- Julho – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 2, 5, 11 e 19, com desvio igual a zero, 12 meses após seu plantio;
- Agosto – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 7, 10, 16 e 17, com desvio igual a zero.

- Setembro – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 8 e 20, com desvio igual a zero.
- Outubro – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 1 e 14, com desvio igual a zero.
- Novembro – serão colhidas as variedades correspondentes aos talhões 3 e 12, com desvio igual a 1, ou seja, 13 meses após seu plantio.

Dos desvios pode-se concluir que os resultados obtidos para a cana-de-açúcar foram os melhores, a maioria foi colhida em seu pico de maturação, quando o desvio considerado é igual a zero.

Para as demais instâncias seguem as Tabelas: 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, que apresentam um resumo do planejamento de colheita, respectivamente, das instâncias I40, I65, I80, I150, I300 e I400. Os resultados apresentados nas tabelas são referentes aos desvios de colheita, dando importância ao momento que serão colhidas as variedades de cana-energia e cana-de-açúcar. As tabelas mostram a quantidade de talhões colhidos de cana-energia e de cana-de-açúcar para cada desvio, considerando os valores inteiros de -3 a 3, respectivamente nos conjuntos D_A e D_E .

Tabela 4.7: Resultado do planejamento para colheita na I40.

DESVIOS	Nº DE TALHÕES	
	Cana-energia	Cana-de-açúcar
-3	0	3
-2	0	2
-1	1	2
0	1	21
1	1	2
2	1	0
3	6	0

A Tabela 4.7, apresenta o resumo do planejamento de colheita para os 10 talhões destinados ao plantio de cana-energia e para os 30 talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar na Instância I40. Os desvios para os talhões de cana-energia foram:

- Desvio -1 (11 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 0 (12 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 1 (13 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 2 (14 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 3 (15 meses após o plantio): 6 talhões.

Para a cana-energia as variedades colhidas com desvio 3 (em 6 talhões) estão em sua melhor produtividade de massa seca.

Os desvios para os talhões de cana-de-açúcar do tipo cana de ano e cana de ano e meio, relativos a Tabela 4.7 foram:

- Desvio -3 (3 meses antes do pico de maturação): 3 talhões;
- Desvio -2 (2 meses antes do pico de maturação): 2 talhões;
- Desvio -1 (1 mês antes do pico de maturação): 2 talhões;
- Desvio 0 (exatamente no pico de maturação): 21 talhões;
- Desvio 1 (1 mês após o pico de maturação): 2 talhões.

Observa-se que a maioria dos talhões foram colhidos com desvio zero, ou seja, no pico de maturação da cana-de-açúcar.

A Tabela 4.8, apresenta o resumo do planejamento de colheita para os 15 talhões destinados ao plantio de cana-energia e para os 50 talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar na Instância I65.

Tabela 4.8: Resultado do planejamento para colheita na I65.

DESVIOS	Nº DE TALHÕES	
	Cana-energia	Cana-de-açúcar
-3	0	4
-2	0	3
-1	1	3
0	1	37
1	1	3
2	1	0
3	11	0

Os talhões de cana-energia foram colhidos de acordo com os seguintes desvios:

- Desvio -1 (11 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 0 (12 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 1 (13 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 2 (14 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 3 (15 meses após o plantio): 11 talhões.

Para a cana-energia as variedades colhidas com desvio 3 (em 11 talhões) estão em sua melhor produtividade de massa seca.

Os desvios para os talhões de cana-de-açúcar, relativos a Tabela 4.8 foram:

- Desvio -3 (3 meses antes do pico de maturação): 4 talhões;
- Desvio -2 (2 meses antes do pico de maturação): 3 talhões;
- Desvio -1 (1 mês antes do pico de maturação): 3 talhões;
- Desvio 0 (exatamente no pico de maturação): 37 talhões;

- Desvio 1 (1 mês após o pico de maturação): 3 talhões.

Para as variedades de cana-de-açúcar a maioria dos talhões foram colhidas com desvio igual a zero, exatamente em seu pico de maturação.

A Tabela 4.9, apresenta o resumo do planejamento de colheita para os 20 talhões destinados ao plantio de cana-energia e para os 60 talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar na Instância I80.

Tabela 4.9: Resultado do planejamento para colheita na I80.

DESVIOS	Nº DE TALHÕES	
	Cana-energia	Cana-de-açúcar
-3	0	4
-2	0	3
-1	1	3
0	1	47
1	1	3
2	1	0
3	16	0

Os talhões de cana-energia foram colhidos de acordo com os seguintes desvios:

- Desvio -1 (11 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 0 (12 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 1 (13 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 2 (14 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 3 (15 meses após o plantio): 16 talhões.

As variedades de cana-energia colhidas com desvio 3 (em 16 talhões) estão em sua melhor produtividade de massa seca.

Os desvios para os talhões de cana-de-açúcar, relativos a Tabela 4.9 foram:

- Desvio -3 (3 meses antes do pico de maturação): 4 talhões;
- Desvio -2 (2 meses antes do pico de maturação): 3 talhões;
- Desvio -1 (1 mês antes do pico de maturação): 3 talhões;
- Desvio 0 (exatamente no pico de maturação): 47 talhões;
- Desvio 1 (1 mês após o pico de maturação): 3 talhões.

Para as variedades de cana-de-açúcar a maioria dos talhões foram colhidas exatamente em seu pico de maturação, ou seja, com desvio igual a zero.

A Tabela 4.10, apresenta o resumo do planejamento de colheita para os 25 talhões destinados ao plantio de cana-energia e para os 125 talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar na Instância I150.

Tabela 4.10: Resultado do planejamento para colheita na I150.

DESVIOS	Nº DE TALHÕES	
	Cana-energia	Cana-de-açúcar
-3	0	18
-2	0	5
-1	1	5
0	1	92
1	1	5
2	1	0
3	21	0

Os talhões de cana-energia foram colhidos de acordo com os seguintes desvios:

- Desvio -1 (11 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 0 (12 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 1 (13 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 2 (14 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 3 (15 meses após o plantio): 21 talhões.

As variedades de cana-energia colhidas com desvio 3 (em 21 talhões) estão em sua melhor produtividade de massa seca.

Para os talhões de cana-de-açúcar os desvios relativos a Tabela 4.10 foram:

- Desvio -3 (3 meses antes do pico de maturação): 18 talhões;
- Desvio -2 (2 meses antes do pico de maturação): 5 talhões;
- Desvio -1 (1 mês antes do pico de maturação): 5 talhões;
- Desvio 0 (exatamente no pico de maturação): 92 talhões;
- Desvio 1 (1 mês após o pico de maturação): 5 talhões.

A maioria dos talhões destinados às variedades de cana-de-açúcar foram colhidos exatamente em seu pico de maturação.

A Tabela 4.11, apresenta o resumo do planejamento de colheita para os 50 talhões destinados ao plantio de cana-energia e para os 250 talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar na Instância I300.

Tabela 4.11: Resultado do planejamento para colheita na I300.

DESVIOS	Nº DE TALHÕES	
	Cana-energia	Cana-de-açúcar
-3	0	53
-2	0	4
-1	1	4
0	1	185
1	1	4
2	1	0
3	46	0

Os desvio relativos às colheitas dos talhões de cana-energia foram:

- Desvio -1 (11 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 0 (12 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 1 (13 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 2 (14 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 3 (15 meses após o plantio): 46 talhões.

As variedades de cana-energia colhidas com desvio 3 (em 46 talhões) estão em sua melhor produtividade de massa seca.

Os desvios para os talhões de cana-de-açúcar, relativos a Tabela 4.11 foram:

- Desvio -3 (3 meses antes do pico de maturação): 53 talhões;
- Desvio -2 (2 meses antes do pico de maturação): 4 talhões;
- Desvio -1 (1 mês antes do pico de maturação): 4 talhões;
- Desvio 0 (exatamente no pico de maturação): 185 talhões;
- Desvio 1 (1 mês após o pico de maturação): 4 talhões.

A maioria dos talhões destinados às variedades de cana-de-açúcar foram colhidos exatamente em seu pico de maturação, desvio igual a zero.

A Tabela 4.12, apresenta o resumo do planejamento de colheita para os 100 talhões destinados ao plantio de cana-energia e para os 400 talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar na Instância I400.

Tabela 4.12: Resultado do planejamento para colheita na I400.

DESVIOS	Nº DE TALHÕES	
	Cana-energia	Cana-de-açúcar
-3	0	77
-2	0	6
-1	1	6
0	1	205
1	1	6
2	1	0
3	96	0

Os desvio relativos às colheitas dos talhões de cana-energia foram:

- Desvio -1 (11 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 0 (12 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 1 (13 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 2 (14 meses após o plantio): apenas 1 talhão;
- Desvio 3 (15 meses após o plantio): 96 talhões.

As variedades de cana-energia colhidas com desvio 3 (em 96 talhões) estão em sua melhor produtividade de massa seca.

Os desvios para os talhões de cana-de-açúcar, relativos a Tabela 4.12 foram:

- Desvio -3 (3 meses antes do pico de maturação): 77 talhões;
- Desvio -2 (2 meses antes do pico de maturação): 6 talhões;
- Desvio -1 (1 mês antes do pico de maturação): 6 talhões;
- Desvio 0 (exatamente no pico de maturação): 205 talhões;
- Desvio 1 (1 mês após o pico de maturação): 6 talhões.

Para as variedades de cana-de-açúcar foram colhidos a maioria dos talhões com desvio igual a zero, ou seja, exatamente em seu pico de maturação.

Nas Tabelas apresentadas, nota-se que em cada instância nenhum talhão de cana-energia foi colhido em um período inferior a 11 meses do seu plantio (desvios -2 e -3), ou seja, nenhum talhão foi colhido com 9 ou 10 meses após o seu plantio, os quais determinam uma menor produtividade para a cana-energia (ver equação (19)). Para as variedades de cana-de-açúcar nenhum talhão foi colhido em período superior a 13 meses do seu plantio (desvios 2 e 3) ou seja, nenhum talhão foi colhido em período superior a dois ou três meses após seu pico de maturação, observa-se que a colheita da cana-de-açúcar com desvio -2 e -3, isto é, em período inferior ao seu pico de maturação determina o mesmo valor de produtividade se essas variedades fossem colhidas com desvios 2 e 3 do seu pico de maturação (ver equação (18)). Neste caso, a colheita das variedades -2 e -3 foi feita de maneira antecipada para atender a demanda mensal da usina.

E de acordo com o tempo de plantio, de crescimento e de colheita das variedades, todas as demandas mensais de produção de sacarose e energia foram atendidas para as instâncias I30 a I400, assim como foram respeitadas a capacidade mensal de moagem e todas as restrições operacionais apresentadas no modelo (2)-(17), visto na seção 3.

Conclusões

Este trabalho propõe um modelo matemático que busca maximizar a produção de sacarose da cana-de-açúcar e a produção de massa seca da cana-energia, determinando a variedade que deverá ser plantada em cada talhão disposto para cada cultura, de cana-de-açúcar e de cana-energia.

A simulação computacional mostra que o modelo é válido na escolha das variedades tanto de cana-de-açúcar quanto de cana-energia a serem plantadas em seus respectivos talhões. Também mostra eficiência no planejamento otimizado de plantio e colheita a fim de atender as demandas mensais de produção da usina.

Quando inserida ao modelo, a cana-energia mostrou a possibilidade das usinas sucroenergéticas investirem na plantação da nova variedade, pois possibilita que além de produzir energia para o seu autossustento, permite que o excedente seja destinado ao comércio.

Sob essa perspectiva, trabalhos futuros procurarão utilizar-se de métodos heurísticos para solucionar problemas de grande porte envolvendo a cana-de-açúcar e a cana-energia, que representados por modelos matemáticos realísticos as práticas das usinas sucroenergéticas. Pretende-se também utilizar estes métodos para obter o planejamento do plantio e colheita das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia para os próximos cortes (do 2º ao 4º corte).

Outra possibilidade para trabalhos futuros está em, considerar, além de as produções de sacarose e massa seca, a produção de etanol e etanol de segunda geração, os quais são de interesse das usinas sucroenergéticas.

Trabalhos apresentados e publicados

CAVERSAN, A.S.; BALBO, A.R. *Métodos de pontos interiores e de programação inteira 0-1 em problemas dinâmicos de custo de coleta e geração de energia da biomassa de cana-de-açúcar*. V Seminário da Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

CAVERSAN, A. S.; BALBO, A.R.; FLORENTINO, H.O.; SOUZA, M.L.P.S.; SILVA, S.C.P. *Métodos de Pontos Interiores e de programação inteira 0-1 em problemas de produtividade associados à colheita e biomassa da cana-de-açúcar*. III ERMAC, 2016.

CAVERSAN, A. S.; SOUZA, M.L.P.S.; BALBO, A.R.; SILVA, S.C.P.; FLORENTINO, H.O. *Métodos de Pontos Interiores e de programação inteira 0-1 em problemas de produtividade associados ao plantio e colheita da cana-de-açúcar*. Revista Eletrônica Paulista de Matemática CQD, 2016.

CAVERSAN, A.S.; BALBO, A.R.; SILVA, S.C.P. *Métodos de otimização em problemas associados ao plantio e à produtividade de cana-de-açúcar*. VI Seminário da Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

CAVERSAN, A.S.; BALBO, A.R.; SILVA, S.C.P. *Modelo matemático para planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia*. VII Seminário da Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Bibliografia

ALEXANDER, A.G. *The energy cane alternative*. Amsterdam: Elsevier. p. 509, 1985.

ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Ag. Nacional de Energia Elétrica, 2008.

BAKKER, H. *Sugar cane cultivation and management*. Kluwer: Academic/Plenum Publisher, p. 679, 1999.

BARBIERI, V; VILLA NOVA, N. A. *Climatologia e a cana-de-açúcar*. Araras: PLANALSUCAR - Coordenadoria Regional Sul - COSUL. p. 1-22. Climatologia, 1977.

BISCHOFF, K.P.; GRAVOIS, K.A.; EAGAN, T.E.; HOY, J.W.; KIMBENG, C.A.; LABORDE, C.M.; HAWKINS, G.L. *Registration of "L79-1002" sugarcane*. Journal of Plant Registrations n. 2, p. 211-217, 2008.

BOLONHEZI, D.; PEREIRA, J. C. V. N. A. *Plantio direto na Alta Mogiana*. O Agrônomo, Campinas, v. 51, p. 12-15, 1999.

BRASIL. *Balanco Energético Nacional 2016 - Ano base 2015: Relatório Final*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2016.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. 1º Levantamento-Safra 2017/18. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_18_11_26_11_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf> Acesso em 19 de abril de 2017.

EVENSEN, C. I.; MUCHOW, R. C.; EL-SWAIFY, S.A.; OSGOOD, R.V. *Yield accumulation in irrigated sugarcane. I. effect of crop age an cultivar*. Agronomy Journal, Madison (WI), n. 89, p 638-646, 1997.

FLORENTINO, H. O. et al. *Multiobjective 0-1 integer programming for the use of sugarcane residual biomass in energy cogeneration*. International Transactions in Operational Research, v. 18, p. 605-615, 2011.

FLORENTINO, H. O. *Programação linear inteira em problemas de aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu, Botucatu, SP, 2006.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. *Sugarcane*. In: TEERE, I.D., PEET, M.M. (Eds.). *Crop-water relations*. New York: A Wiley Interscience, p. 445-479, 1983.

GIAMALVA, M.J.; CLARKE, S.J.; STEIN, J.M. *Sugarcane hybrids of biomass*. *Biomass*, n. 6, p. 61-68, 1984.

GOLDEMBERG, J; LUCON, O. *Energia e meio ambiente no Brasil*. *Revista Estudos Avançados IEA*, v. 21 (59), p. 7 - 20, 2007.

HOMEM, T. P. D. *Procedimento híbrido envolvendo os métodos primal-dual de pontos interiores e branch-and-bound em problemas multiobjetivo de aproveitamento de resíduos de cana-de-açúcar*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, SP, 2010.

HOMEM, T. P. D.; BALBO, A. R.; FLORENTINO, H. O. *Optimal Energy Generation with Biomass of Sugarcane Harvest*. *Revista IEEE América Latina*, v. 1, p. 653-658, 2011.

IBM, *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/software/products/pt/ibmilogcpleoptistud>> Acesso em: 01 de junho de 2017.

LIMA, A. D. *Otimização do aproveitamento do palhicho de cana-de-açúcar*. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2009.

LIMA, C. *Métodos híbridos de pontos interiores e de programação inteira 0-1 para problemas de custo de colheita da cana-de-açúcar e de custo de coleta e geração de energia relacionados à sua biomassa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013.

LIMA, C.; BALBO, A.R. ; FLORENTINO, H. O. *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*, p. 1-18, 2016.

MARCHIORI, L. F. S. *Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar*. Tese de Doutorado. Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

MARIANO, J. *Cana-energia, a revolução sucroenergética está começando*. Publicado em 20 de out. de 2015. Disponível em:

<<https://www.novacana.com/n/cana/variedades/especial-cana-energia-revolucao-sucroenergetica-201015/>> Acesso em: 23 de junho de 2017.

MATSUOKA, S. et al. *A evolução do Proálcool*. Revista Agroanalysis, Mercado & Negócios, p. 29 - 30, 2016.

MATSUOKA, S.; ARIZONO, H.; BASSINELLO, A.I.; GARCIA, A. A. F.; GHELLER, A. C. A.; GIGLIOTI, E.; HOFFMANN, H. P.; MASUDA, Y. *Seis novas variedades RB de cana-de-açúcar*. Araras : UFSCar, p. 24, 1998.

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. *Bioenergia de cana*. Livro Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Etanol. Tecnologias e Perspectivas, 1 ed., cap. 20, p.547-577, Editado por Santos, Fernando; Borém, Aluizio; Caldas, Celso, 2010.

MATSUOKA, S.; KENNEDY A. J.; DIAS DOS SANTOS, E. G., TOMAZELA A. L., RUBIO, L. C. S. *Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects*. Advances in Botany, v.2014,p.13,2014

MMA - Ministério do Meio Ambiente, *Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima*. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FIFIN.pdf>> Acesso em 29 de junho de 2017.

NERVIS, J.J. *Planejamento Otimizado da Colheita da cana-de-açúcar e aproveitamento da biomassa*. Tese de Doutorado em Agronomia - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

NOVACANA. *Aspectos do Plantio da Cana-de-Açúcar*. Publicado em 10 de jan. de 2013. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/aspectos-plantio-cana-de->

acucar/> Acesso em: 23 de junho de 2017.

RAMOS, R. P. *Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização*. Tese de Doutorado em Agronomia - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

RAMOS, R.P.; ISLER, P.; FLORENTINO, H. O.; JONES, D.; NERVIS, J. *An optimization model for the combined planning and harvesting of sugarcane with maturity considerations*. African Journal of Agricultural Research, v. 11, p. 3950-3958, 2016.

RIPOLI, T. C. C. e RIPOLI, M. L. C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. USP-ESALQ, Piracicaba, SP, 2004.

RIPOLI, T. C. C. *Utilização do material remanescente da colheita de cana-de-açúcar (saccharumssp) – equacionamento dos balanços energético e econômico*. Dissertação de Mestrado. ESALQ, USP, Piracicaba, SP, 1991.

ROCHA, A. M. C. *Emergência, perfilhamento e produção de cana-de-açúcar (saccharum spp.) em função das épocas de plantio no estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

RODOLFO JR, F. *Caracterização de variedades de cana-soca sob diferentes regimes hídricos no cerrado*. Tese de Doutorado em Agronomia. Brasília, 2015.

SILVA, L. M. *Algoritmo genético na otimização do custo de colheita e de transporte da cana-de-açúcar*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrônomicas – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2011.

SOUZA, M. L. P. S. *Planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar para a maximização da produção de sacarose considerando uma demanda mensal da usina*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.

TOLENTINO, G. *Programação linear inteira aplicada ao aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrônomicas,

Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2007.

UNICA, União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. *Acompanhamento quinzenal da safra na região Centro-Sul*. Disponível em:

< www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=40377637> Acesso em: 30 de junho de 2017.

UNICA. União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, *Estimativa de Moagem*.

Disponível em: <www.unicadata.com.br/download_media.php?idM=15329060>

Acesso em: 30 de junho de 2017.