

MARIA LAURA PARRA SPAGNUOLO DE SOUZA

PLANEJAMENTO OTIMIZADO DO PLANTIO E COLHEITA DA CANA-
DE-AÇÚCAR PARA A MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SACAROSE
CONSIDERANDO UMA DEMANDA MENSAL DA USINA

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho“, Campus de Bauru, como parte dos requisitos para 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. Dr. Antonio Roberto Balbo

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helenice de Oliveira Florentino Silva

BAURU/SP

Agosto/2017

Souza, Maria Laura Parra Spagnuolo de.

Planejamento otimizado do plantio e colheita da
cana-de-açúcar para a maximização da produção de
sacarose considerando uma demanda mensal da usina /
Maria Laura Parra Spagnuolo de Souza, 2017
40 f.

Orientador: Antonio Roberto Balbo

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

1. Produção de cana-de-açúcar. 2. Plantio e
Colheita. 3. Setor sucroenergético. 4. Programação
inteira 0-1. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MARIA LAURA PARRA SPAGNUOLO DE SOUZA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.


Aos 02 dias do mês de junho 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; Prof. Dr. LUIZ HENRIQUE CHERRI do(a) Departamento de Ciências da Computação e Matemática Computacional / Universidade de São Paulo/São Carlos, Profa. Dra. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MARIA LAURA PARRA SPAGNUOLO DE SOUZA, intitulada

PLANEJAMENTO OTIMIZADO DO PLANTIO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA A MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SACAROSE CONSIDERANDO UMA DEMANDA MENSAL DA USINA

. 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



Prof. Dr. LUIZ HENRIQUE CHERRI



Profa. Dra. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

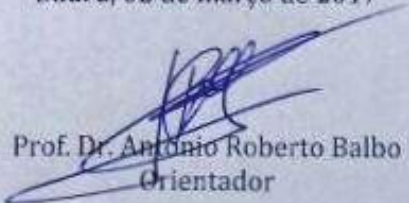
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: MARIA LAURA PARRA SPAGNUOLO DE SOUZA

DE: "MÉTODOS HÍBRIDOS DE PONTOS INTERIORES E DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA 0-1 EM PROBLEMAS MULTI OBJETIVOS DE CUSTO DE TRANSPORTE E GERAÇÃO DE ENERGIA DA BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR."

PARA:

PLANEJAMENTO OTIMIZADO DO PLANTIO E COLHEITA DA
CANVA-DE-AÇÚCAR PARA A MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE
SACAROSE CONSIDERANDO UMA DEMANDA MENSAL DA USINA

Bauru, 02 de março de 2017


Prof. Dr. Antonio Roberto Balbo
Orientador

*Aos meus orientadores Balbo e Helenice,
aos meus pais e irmãos,
este trabalho é dedicado a vocês.*

Agradecimentos

À Deus, pela vida abençoada, pela família maravilhosa, pelos amigos e pela força que precisei para passar por todas as dificuldades encontradas durante esses dois anos.

Aos meus pais, Isaias Reginaldo e Lúcia Helena, meus maiores exemplos. Sou extremamente grata por todos os incentivos, broncas, tolerância e por sempre acreditarem em mim, em diversos momentos em que eu mesma descreditava. Poucas são as palavras que podem traduzir todo o meu amor e respeito a vocês, não somente durante esses dois anos, como também durante toda a minha vida.

Aos meus familiares, e em especial minha irmã Luísa, pela torcida, fé, brincadeiras, preocupações e todo o carinho com que contei durante esse tempo.

Ao meu orientador Antonio Roberto Balbo, que com sua inteligência, bondade e enorme paciência tem me orientado desde a iniciação científica. Agradeço pela oportunidade, por toda a confiança e conselhos, durante esses longos anos. Agradeço acima de tudo por ensinar a acreditar em mim mesma e que no fim tudo dará certo. Diversas vezes foram suas palavras que mais me tranquilizaram.

À minha co-orientadora Helenice, pelas ideias, correções, cuidados, compreensão e conselhos. É uma grande profissional que aprendi a respeitar e admirar.

À banca pelas correções e cuidado desde a qualificação até este momento.

À colega Camila de Lima, que desde a iniciação científica tem me ensinado muito a respeito da programação e também sobre as características em geral da cana-de-açúcar. Sem o seu apoio esse trabalho nunca poderia ter sido desenvolvido.

Às minhas grandes amigas Amanda Caversan e Marina Teixeira, que me acompanham desde a graduação. Vocês duas foram meus pilares em Bauru.

Aos meus colegas de Laboratório: Diego, Elis, Gabriela e Rafael, pela contribuição, paciência, companhia e amizade.

Aos professores dos cursos de Mestrado em Engenharia Elétrica e Licenciatura em Matemática, pelos ensinamentos, e por fazerem parte da minha formação acadêmica.

À equipe do Colégio Rembrandt COC, em especial aos monitores, Antônio Salles e Pamella Garcia, por todo o encorajamento e compreensão em diversos momentos.

À todos os colegas, professores e funcionários Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia e ao Departamento de Matemática, pela colaboração e atenção.

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

“Eu reconheço que nem todo dia será ensolarado, mas quando você se encontrar perdido na escuridão e no desespero, lembre-se: é somente na escuridão da noite que podemos ver as estrelas. Então não tenha medo de cometer erros, ou de tropeçar e cair, pois na maioria das vezes os melhores prêmios vêm quando se faz àquilo que você mais teme.”

(Autor Desconhecido)

Resumo

A busca por fontes renováveis de energia fez com que a cana-de-açúcar ganhasse destaque, pois, além de possibilitar a produção de açúcar e etanol, também pode ser utilizada para a cogeração de energia, que é uma fonte limpa com baixo impacto ambiental. Os processos envolvidos na área de produção sucroenergética são complexos e possibilitam sua investigação e tratamento através de modelos matemáticos e métodos computacionais, respectivamente. Este trabalho considera um modelo matemático, que objetiva melhorar o planejamento do plantio e da colheita da cana-de-açúcar, visando a maximização da produção de sacarose da usina. Neste modelo são adicionadas novas restrições para que seja atendida uma demanda mensal de produção de sacarose, pré-estabelecida pela usina. Para sua validação utilizam-se dados reais de variedades de cana-de-açúcar e os testes computacionais são realizados utilizando um *software* de programação inteira. Os resultados obtidos mostram que o modelo proposto apresenta potencial para auxiliar a usina no planejamento do plantio e da colheita da cana-de-açúcar.

PALAVRAS CHAVE: Produção da cana-de-açúcar; Plantio e Colheita; Setor Sucroenergético; Programação Inteira 0-1.

Abstract

The search for renewable sources of energy has made the sugarcane to gain prominence because, in addition for allowing the production of sugar and ethanol, it can also be used for energy cogeneration, which is a clean source with low environmental impact. The processes involved in the area of sugarcane production sector are complex and enable their investigation and treatment through mathematical models and computational methods, respectively. This work considers a mathematical model, which aims to improve the planning of the sugarcane planting and harvesting, aiming to maximize sucrose production by the mill. In this model, new restrictions are added so that a monthly demand for sucrose production, pre-established by the mill, it is considered. For its validation, actual sugarcane varieties are used and the problems are solved using an integer programming software. The results show that the proposed model has potential to assist the mill in the planning of the sugarcane planting and harvesting.

Keyword: Productivity of sugarcane; Planting and Harvesting; Sugarcane Sector; Integer Programming 0-1;

Lista de tabelas

Tabela 1 - Dados das variedades de cana-de-açúcar	25
Tabela 2- Dados de entrada para os problemas CANA16, CANA30, CANA60 e CANA100	26
Tabela 3 - Resultados dos problemas com relação à produção de sacarose.....	26
Tabela 4 - Resultados detalhados do problema CANA16.....	27
Tabela 5 - Resultados detalhados do problema CANA30.....	27
Tabela 6 - Resultados detalhados do problema CANA60.....	28

Sumário

Introdução	12
Capítulo 1 - Revisão bibliográfica	15
Capítulo 2 - Modelo matemático de planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar ..	19
2.1 O modelo matemático	19
Capítulo 3 - Metodologia de solução e resultados de testes computacionais.....	24
3.1 Validação do modelo.....	24
3.2 Testes computacionais.....	24
3.3 Dados para os testes computacionais	25
3.4 Resultados	26
Conclusões e Trabalhos futuros	33
Trabalhos apresentados e publicados	34
Referências bibliográficas	35
Anexo A - Programação desenvolvida em ambiente OPL.....	38

Introdução

O maior produtor mundial de cana-de-açúcar é o Brasil, segundo a UNICA (2016). Também é o maior produtor e exportador de açúcar, e ainda segundo maior produtor de etanol. Dados da CONAB (2017) apontam uma previsão da produção total de cana-de-açúcar destinada à indústria, para a safra 2017/18 que será de 647,6 milhões de toneladas.

Considerando o crescimento anual da demanda de cana-de-açúcar e a importância da melhoria de sua produtividade em sacarose, torna-se necessário um planejamento adequado do sistema de produção desta. Segundo Ramos (2014), o planejamento do plantio dessa cultura contribui para a melhoria de sua produtividade e é uma tarefa complexa, pois cada variedade de cana-de-açúcar tem uma produtividade diferente e, ainda, deve se considerar a sua rebrota e período de maturação.

De acordo com Marchiori (2004), Rocha (1984) e Barbieri & Villa Nova (1977), o período de plantio da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do país pode ser realizado num longo período do ano, devido às condições climáticas favoráveis encontradas. O seu plantio pode ser feito em duas épocas do ano e são denominados como “plantio de cana de ano” e “plantio de cana de ano e meio”. O plantio de cana de ano normalmente é realizado nos meses de setembro e outubro e permite a colheita desta após, aproximadamente, 12 meses depois do seu plantio. O plantio de cana de ano e meio normalmente é realizado nos meses de janeiro a abril e permite a colheita desta 18 meses após o seu plantio.

A produtividade é maior em áreas com o plantio de variedades do tipo cana de ano e meio, quando comparadas às variedades do tipo cana de ano, uma vez que a primeira permanece tempo mais longo no campo (entre 16 e 20 meses), de acordo com Ramos (2014) e Miller (2000).

Conforme visto em Rodolfo Jr (2015), Gascho & Shih (1983) e Bolonhezi & Pereira (1999), depois que é feito o primeiro corte na cana do tipo ano e meio, seu ciclo passa a ser anual e ela é denominada cana-soca. É denominada ressoca nos demais cortes até a última colheita. Depois deste ciclo é feita a renovação do canavial. Na lavoura de cana-de-açúcar é comum haver três a seis colheitas consecutivas, e essa quantidade de colheita depende de vários fatores: variedades escolhidas, manejo de solo e de água, além do clima.

Segundo informações, divulgadas no portal Nova Cana (2013), o plantio com variedades do tipo cana de ano é adotado em cerca de 20% dos casos, por sua produtividade ser menor, uma vez que tem um crescimento efetivo em menos tempo. Com esse tipo de plantio a terra sempre será cultivada com cana-de-açúcar. Já na plantação com variedades do tipo cana de ano e meio, quando finalizado o ciclo do canavial, deve ser feita uma rotatividade de cultura (que é uma técnica agroecológica em que as espécies cultivadas são alternadas em diferentes períodos, na mesma área). Nessa escolha, a produtividade é maior.

Este trabalho aborda o problema investigado em Ramos (2014), que visa otimizar o planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar, considerando os dois tipos de cana citados, de ano e de ano e meio, visando a maximização da produção de sacarose. O objetivo é propor um modelo, baseado em Ramos (2014), adicionando novas restrições, as quais estão relacionadas ao atendimento da demanda mensal de produção de sacarose da usina, além das restrições operacionais e de campo.

A máxima produção de sacarose da cana-de-açúcar pode ser alcançada se esta for colhida no mês de máxima maturação, ou seja, no pico de máxima maturação da cana. Porém, nem sempre é possível atender este requisito, devido às limitações operacionais que ocorrem no processo de colheita da cana-de-açúcar, tais como a limitação da capacidade de moagem da usina; além do fato de existir uma demanda mensal de sacarose, que para ser atendida, em alguns casos exige que a colheita seja realizada em um período fora do seu pico de máxima maturação. Desta forma, este trabalho considera uma flexibilização na seleção do mês de colheita em cada talhão, permitindo que a cana seja colhida com um desvio para mais ou para menos do mês de máxima maturação.

Nesse trabalho considera-se um desvio nulo quando a colheita é feita no pico de máxima maturação da cana-de-açúcar, podendo haver um desvio entre -3 e 3, em que -3 significa que a cana é colhida três meses antes de seu pico de maturação e 3 que a variedade é colhida três meses após o seu pico de maturação.

O modelo auxilia nas tomadas de decisões quanto a variedade de cana-de-açúcar que deverá ser plantada em cada um dos talhões; quanto ao mês que este plantio deverá acontecer e quanto ao mês que a cana deverá ser colhida. Esse modelo impõe algumas restrições operacionais impostas pela usina, a fim de que a solução obtida seja o mais próximo possível da realidade desta.

O modelo foi testado utilizando instâncias com dados de variedades de cana-de-açúcar fornecidos por uma usina próxima à cidade de Botucatu-SP, baseado em Nervis (2015). Em todas as instâncias foram consideradas vinte variedades de cana-de-açúcar; seis meses para plantio (janeiro, fevereiro, março, abril, setembro e outubro) e oito meses de colheita (abril a novembro).

O presente trabalho encontra-se dividido da seguinte forma: no Capítulo 1 é feita uma revisão bibliográfica, apresentando uma história da arte com os trabalhos que foram base para o desenvolvimento do novo modelo proposto. No Capítulo 2 é proposto o novo modelo matemático, referente à maximização da produção de sacarose da cana-de-açúcar, buscando otimizar o plantio e a colheita das variedades e considerando uma demanda mensal pré-estabelecida pela usina. No Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada no trabalho e os testes computacionais feitos a partir da implementação do modelo matemático desenvolvido. Neste capítulo também são apresentados os dados para estes testes e seus resultados. Em seguida, é feita a conclusão do trabalho em que são indicadas as possibilidades de estudo e pesquisa futuros. O apêndice A inclui a programação desenvolvida no *software* CPLEX.

Capítulo 1 - Revisão bibliográfica

Existe uma extensa literatura que aborda a modelagem matemática visando otimizar processos envolvidos no manejo da cana-de-açúcar para produção de energia, açúcar e etanol.

No trabalho de Ripoli (1991) é proposto um modelo para determinar a eficiência do palhiço e bagaço da cana-de-açúcar, dado pela relação entre a quantidade de energia, em forma de combustível, consumida pelas máquinas envolvidas nas operações e a quantidade de energia existente no palhiço.

Ripoli e Ripoli (2004) apresentam um trabalho que retrata o setor sucroalcooleiro no Brasil, histórico da colheita mecanizada, queima de canaviais e suas implicações técnico-ambientais, sistemas de recolhimento de palhiço, potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na colheita de cana, tráfego no canavial e outros. O livro apresenta, através de gráficos, figuras e fotografias a evolução e o estágio de desenvolvimento de sistemas de colheita da biomassa canvieira, sua caracterização, as consequências ao ambiente, considerações a respeito de sistemas de plantio e propostas metodológicas para ensaios padronizados de máquinas utilizadas em sistemas de colheita de cana-de-açúcar e de seu palhiço.

Em Florentino (2006) são desenvolvidos modelos matemáticos que tem por objetivo a minimização do custo de coleta e transporte da biomassa residual da cana-de-açúcar e a maximização do balanço da energia dessa biomassa.

No trabalho de Tolentino (2007) o método *branch-and-bound* é utilizado para a investigação dos modelos matemáticos que determinam a escolha das variedades de cana-de-açúcar que deverão ser plantadas nas áreas agrícolas da usina, que produzam palhiço a um mínimo custo de coleta e/ou ofereça um balanço ótimo de energia proveniente desse palhiço.

Um modelo multiobjetivo, que otimiza o custo de coleta da biomassa residual e a geração de energia, apresentados por Florentino (2006), é resolvido no trabalho de Lima (2009) gerando um conjunto de soluções que podem ser escolhidas de acordo com os interesses da usina.

Homem (2010) investiga modelos matemáticos multiobjetivos que auxiliam na escolha das variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas, de forma a minimizar o custo de coleta da

biomassa residual e avaliar o balanço de energia gerado. Utilizou um método híbrido envolvendo os métodos de pontos interiores e *branch-and-bound*; o primeiro para determinar uma solução eficiente e o segundo para integralizá-la.

Propõe-se um modelo matemático, em Silva (2011), para determinar qual o tipo de variedade deve ser selecionada para o plantio, de forma a obter o menor custo possível para o processo de colheita e transporte da cana-de-açúcar. Para resolver o problema, o autor implementa um algoritmo genético. Depois de obtido os seus resultados comparou-os ao método *branch-and-bound*.

Em Florentino et al. (2011) um modelo de otimização multiobjetivo de programação linear inteira é proposto para que haja a escolha de variedades de cana-de-açúcar de forma a minimizar os custos na utilização de resíduos de culturas e simultaneamente maximizar o balanço energético em tal processo.

No mesmo ano, Homem, Balbo e Florentino (2011) aplicam os métodos de Pontos Interiores e *branch-and-bound* em modelos de otimização multiobjetivos relacionados à biomassa residual da colheita de cana-de-açúcar. Estes métodos mostraram sua viabilidade para auxiliar na escolha das variedades de plantio de cana-de-açúcar, buscando reduzir o custo e aumentar o balanço energético da biomassa residual da colheita, os quais têm objetivos conflitantes.

Lima (2013) apresenta um trabalho visando desenvolver métodos híbridos, envolvendo os métodos de pontos interiores e de programação inteira binária, o qual aprimora o método desenvolvido em Homem (2010). Este método é utilizado para a resolução de problemas mono-objetivos e multiobjetivos referentes à minimização da colheita da cana-de-açúcar e do custo de coleta de sua biomassa residual e à maximização do balanço de energia relativo ao aproveitamento dessa biomassa. Baseando-se neste trabalho, em Lima et al. (2016), a solução do modelo multiobjetivo é realizada com o auxílio dos métodos da Soma Ponderada e ϵ -Restrito, que transformam este problema em um conjunto de problemas mono-objetivos, os quais podem ser solucionados por um método híbrido, combinando os métodos preditor-corretor primal-dual de pontos interiores e *branch-and-bound*, utilizados para a determinação de soluções eficientes (Pareto ótimas) do problema multiobjetivo.

São formulados dois modelos de otimização em Ramos (2014) para auxiliar no planejamento do plantio da cana-de-açúcar. O autor divide a metodologia proposta em duas partes: a primeira consistindo em planejar, de forma otimizada, a divisão da área de plantio em

talhões, visando o máximo rendimento da colhedora da cana-de-açúcar. A segunda, em utilizar o modelo de otimização proposto para escolher a variedade de cana-de-açúcar que deve ser plantada em cada talhão e determinar em qual período do ano se deve fazer o plantio, de forma a maximizar a produção total ao longo de quatro cortes. Propõe também um algoritmo genético para a resolução do problema de planejamento do plantio.

A partir do trabalho desenvolvido em Ramos (2014), Ramos et al. (2016) propõem um modelo que utiliza estratégias matemáticas e computacionais para assegurar que a data de colheita da cana-de-açúcar, que já esteja plantada em um determinado talhão, seja no período de maturação máxima, e que ainda considere uma demanda anual da produção de sacarose. Este modelo de otimização não-linear binário é resolvido pelo algoritmo genético proposto em 2014, considerando um planejamento ótimo com potencial de produção de cana-de-açúcar 17,8% acima da produção obtida por meios convencionais na usina.

Nervis (2015) apresenta uma metodologia para o planejamento otimizado do período da colheita da cana-de-açúcar visando à maximização da produção de Pol (porcentagem em massa de sacarose aparente contida na cana-de-açúcar) e a de cana-de-açúcar, respeitando todas as restrições impostas pela usina. O processo de otimização foi realizado utilizando o Algoritmo Genético (AG). Os períodos de colheita dos talhões pertencentes a uma unidade agrícola da usina foram planejados alcançando a máxima produção de sacarose em um horizonte de planejamento de quatro anos.

A partir do modelo estudado e resolvido em Lima (2013) e o proposto em Ramos (2014), foi proposto neste trabalho um modelo cujo destaque está no atendimento da demanda mensal de produção de sacarose, a partir da escolha das variedades de cana que deverão ser plantadas e da escolha do período de colheita, possivelmente em seu pico de máxima maturação, visando a máxima produtividade de sacarose.

Para formulação desse modelo são consideradas duas épocas de plantio, de acordo com a região Centro Sul do Brasil: a primeira, quando a cana-de-açúcar é plantada nos meses de janeiro, fevereiro ou março, e estas devem ser colhidas 18 meses após o plantio, por isto denominada "cana de ano e meio", e a segunda, quando a cana-de-açúcar é plantada entre os meses de setembro e outubro, e colhida 12 meses e por isto denominada de "cana de ano". O período indicado para colheita está ligado ao tempo necessário para maturação da cana, chamado período útil industrial. No caso da cana ser colhida fora do ponto de máxima

maturação, pode haver perda de qualidade da cana, qualidade esta medida pela produtividade de sacarose.

Nas usinas, devido à limitação de capacidade de operação envolvendo os processos de corte, carregamento, transporte e moagem, nem sempre é possível que a colheita possa ser feita no período de máxima maturação. A perda de qualidade da cana é pequena quando seu corte é feito até 3 meses antes ou 3 meses depois do seu pico de maturação. Dessa forma, no modelo proposto e apresentado no Capítulo 2 é considerada uma variável de desvio que permite uma flexibilização na escolha do mês em que deverá ocorrer a colheita da variedade, dentro do intervalo citado.

Capítulo 2 - Modelo matemático de planejamento otimizado do plantio e colheita da cana-de-açúcar

Neste capítulo é proposto um modelo matemático para auxiliar na determinação do planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar, visando a maximização da produção de sacarose. A cana deve ser colhida o mais próximo possível do pico de máxima maturação. Assim, para a decisão do mês em que a cana deve ser colhida utiliza-se uma variável referente ao desvio da colheita com relação ao pico de maturação. Restrições de atendimento da demanda mensal, de campo e operacionais da usina devem ser consideradas. Desta forma, o modelo é apresentado a seguir:

2.1 O modelo matemático

Para formulação do modelo são definidos:

- Os índices:

j : índice associado aos talhões;

i : índice associado às variedades de cana-de-açúcar;

h : índice associado ao mês de plantio;

d : índice associado aos desvios do mês de pico máximo de colheita da variedade;

m : índice associado ao mês de colheita;

- Os parâmetros:

k : número de talhões em que a cana-de-açúcar será plantada;

n : número de variedades de cana-de-açúcar;

L_j : valor da área do talhão j ;

P_i0 : valor da produtividade da variedade i no ano inicial (plantio);

S : valor associado à média da de produtividade;

P_{ild} : variável associada ao valor da produtividade da variedade i no primeiro ano de colheita;

- As variáveis do modelo são:

D_j : variável associada ao valor do desvio da data de colheita no talhão j ;

IO_j : variável associada à variedade i selecionada para ser plantada no talhão j ;

TO_j : variável associada ao mês de plantio da cana-de-açúcar no talhão j ;

TI_j : variável associada ao mês de colheita da cana-de-açúcar no talhão j ;

x_{ijhd} : variável binária de decisão da plantação da variedade i no talhão j no mês h com desvio d ;

t_{ijmd} : variável binária de decisão da colheita da variedade i que estava plantada no talhão j no mês m com desvio d ;

- Os conjuntos utilizados para a definição do modelo são:

H_1 : conjunto de meses em que poderá haver plantio para canas do tipo “ano e meio”, tal que $H_1 = \{1, 2, 3, 4\}$, em que 1 representa o mês de janeiro, 2 representa o mês de fevereiro, e assim respectivamente;

H_2 : conjunto de meses em que poderá haver plantio para canas do tipo “ano”, tal que $H_2 = \{9, 10\}$, em que 9 representa o mês de setembro e 10 representa o mês de outubro;

H : conjunto completo de meses em que poderá haver plantio envolvendo cana de ano e cana de ano e meio, $H = H_1 \cup H_2$;

M : conjunto de meses em que poderá haver colheita, tal que $M = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$, em que 4 representa o mês de abril, 5 representa o mês de maio e assim respectivamente;

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

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

Dev : conjunto de desvios permitidos, a partir da correta data de colheita;

Dem_m : conjunto de demanda que deverá ser atendido no mês m ;

Considerando-se os índices, parâmetros, variáveis e conjuntos definidos anteriormente, o modelo proposto, (1) – (13), é apresentado a seguir.

$$\text{maximizar } \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} P_{i1d} L_j t_{ijmd} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{h \in H} \sum_{d \in Dev} P_{i0} L_j x_{ijhd} \geq S \quad \forall j = 1 \dots k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{h \in H} \sum_{d \in Dev} x_{ijhd} = 1 \quad \forall j = 1 \dots k \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{h \in H} \sum_{d \in Dev} x_{ijhd} \leq 0,2n \quad \forall i = 1 \dots n \quad (4)$$

$$I0_j = \sum_{i \in I_1} \sum_{h \in H_1} \sum_{d \in Dev} i x_{ijhd} + \sum_{i \in I_2} \sum_{h \in H_2} \sum_{d \in Dev} i x_{ijhd} \quad \forall j = 1 \dots k \quad (5)$$

$$T0_j = \sum_{i \in I_1} \sum_{h \in H_1} \sum_{d \in Dev} h x_{ijhd} + \sum_{i \in I_2} \sum_{h \in H_2} \sum_{d \in Dev} h x_{ijhd} \quad \forall j = 1 \dots k \quad (6)$$

$$I0_j = \sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} i t_{ijmd} \quad \forall j = 1 \dots k \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} t_{ijmd} = 1 \quad \forall j = 1 \dots k \quad (8)$$

$$T1_j = T0_j + \sum_{i \in I_1} \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} (18 + d) t_{ijmd} + \sum_{i \in I_2} \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} (12 + d) t_{ijmd} \quad \forall j = 1 \dots k \quad (9)$$

$$T1_j = \sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{d \in Dev} m t_{ijmd} + 12 \quad \forall j = 1 \dots k \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m \in M} \sum_{j=1}^k P_{i1d} L_j t_{ijmd} \geq Dem_m \quad \forall m \in M \quad (11)$$

$$x_{ijhd} \in \{0, 1\} \text{ em que } i = 1, \dots, n ; j = 1, \dots, k ; h \in H ; d \in Dev \quad (12)$$

$$t_{ijmd} \in \{0, 1\} \text{ em que } i = 1, \dots, n ; j = 1, \dots, k ; m \in M ; d \in Dev \quad (13)$$

A função objetivo (1) visa à maximização da produção de sacarose da cana-de-açúcar plantada nos k talhões e colhidas considerando o desvio d . Na função objetivo temos P_{i1d} , que é calculada da seguinte forma:

$$P_{i1d} = (-0,0243d^2 + 1)P_{i0} \quad (14)$$

A equação (14) é baseada em Nervis (2015). Quanto mais próximo de zero o desvio d maior o valor de P_{i1d} . Quando d é nulo, maior a qualidade da matéria prima colhida, uma vez

que o período de colheita será na data do pico de maturação da cana. Quanto mais longe desta data, maior é a perda na qualidade da cana em termos de sacarose, fibra e outros.

A restrição (2) refere-se a demanda de sacarose. O cálculo do S é apresentado na equação (15):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_{i0} L_j}{nk} \quad (15)$$

A restrição (3) garante que para cada talhão j deverá ser atribuído uma variedade i para plantio, e este plantio deverá ser realizado em um único período h do ano. Essa restrição garante que não haja a possibilidade de que em um talhão j exista mais de uma variedade i plantada.

A restrição (4) limita a quantidade máxima de talhões j em que a variedade i poderá ser plantada. Essa restrição foi baseada em Lima (2013) e é equivalente à uma restrição inicialmente criada e baseada em Ramos (2014), que limita a área de cada talhão L_j em que cada variedade poderá ser plantada. A restrição baseada em Ramos (2014) é mostrada na equação (16):

$$\sum_{j=1}^k \sum_{h \in H} \sum_{d \in Dev} L_j X_{ijhd} \leq 0,15 \sum_{j=1}^k L_j \quad \forall i = 1 \dots n \quad (16)$$

A restrição (5) define a variedade i que será selecionada para ser plantada no mês h no talhão j .

A restrição (6) define o mês T_{0j} em que a variedade i será plantada no talhão j .

A restrição (7) garantirá que a variedade i que será plantada no mês h no talhão j será a mesma variedade i a ser colhida no mês m nesse mesmo talhão j selecionado.

A restrição (8) garante que cada variedade i plantada no talhão j tenha uma única colheita m anual. Essa restrição foi feita para que não aconteçam situações em que, por exemplo, seja feita uma colheita em um talhão j duas ou mais vezes por ano.

A restrição (9) determina o mês TI_j que será feita a primeira colheita da variedade i plantada no talhão j após 18 meses (cana de ano e meio) de seu plantio sob um desvio d escolhido, ou após 12 meses (cana de ano) de seu plantio sob um desvio d escolhido.

A restrição (10) identifica qual o mês m do ano que será feita a colheita, dado TI_j que é a idade em meses da cana-de-açúcar plantada no talhão j .

A restrição (11) refere-se ao atendimento da demanda mensal.

As restrições (12) e (13) definem as variáveis binárias do problema. A variável de decisão definida em (12) decide qual variedade i deverá ser plantada no talhão j no mês h . Por

tratar-se de uma área de renovação, (não existe cana soca ou de ressoça na área do canavial), considera-se o desvio nulo ($d = 0$) no plantio da variedade i . A definição da variável de decisão para qual mês m a variedade i plantada no talhão j deverá ser colhida, com a possibilidade de uma flexibilização no mês de plantio determinada pelo desvio $d \in Dev$ é feita em (13).

No Capítulo 3 são realizados e discutidos testes computacionais do modelo proposto.

Capítulo 3 - Metodologia de solução e resultados de testes computacionais

Neste Capítulo são apresentados os testes computacionais para a validação do modelo, utilizando algumas instâncias.

O software CPLEX é utilizado para a resolução do modelo proposto, utilizando a interface OPL. O código é apresentado no Anexo A.

3.1 Validação do modelo

O modelo está implementado no software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio no ambiente de programação OPL. Essa implementação é apresentada no Anexo A, no final do trabalho.

A validação do modelo é realizada a partir da implementação computacional deste utilizando dados de um problema real contendo 20 variedades de cana-de-açúcar e talhões com área de 20 hectares.

3.2 Testes computacionais

Os testes computacionais são realizados em um computador com processador Intel Core i7, 2.50GHz e 8.0 GB de memória RAM.

Em relação às 20 variedades de cana-de-açúcar consideradas nos testes computacionais, 14 variedades são cana de ano e meio e 6 são cana de ano, em que o pico de maturação é de 18 meses após realizado o plantio do primeiro tipo e de 12 meses para o segundo.

Os talhões considerados nos testes tem uma área de 20 hectares, com a possibilidade de escolha para o plantio das 20 variedades consideradas, em um conjunto de 6 meses (janeiro, fevereiro, março, abril, setembro, outubro). A possibilidade de escolha para a colheita está em um conjunto de 8 meses (abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro). Além disso, são permitidos 7 desvios relacionados ao mês da maturação das variedades considerados para a sua colheita. Por exemplo, uma variedade do tipo cana de ano e meio que é plantada no mês de abril em um determinado talhão alcança sua maturação 18 meses depois, ou seja, em outubro. Porém, é selecionado o mês de agosto para que ocorra a sua colheita; isso significa que houve uma flexibilização de dois meses para colhê-la, assim o desvio determinado para essa situação é o -2 (dois meses antes da maturação).

São consideradas as 20 variedades de cana-de-açúcar, para a resolução de 4 instâncias indicadas da seguinte forma: a primeira chamada CANA16 em que existem 16 talhões na Usina; a segunda chamada CANA30, com 30 talhões; a terceira chamada CANA60, com 60 talhões e a última CANA100, com 100 talhões.

3.3 Dados para os testes computacionais

Os dados das variedades da cana de açúcar estão descritos na Tabela 1, com relação à produtividade que cada variedade gera. Estes dados são baseados em Nervis (2015). As variedades de 1 a 14 são as variedades do tipo cana de ano e meio, e as variedades de 15 a 20 são as do tipo cana de ano.

Tabela 1 - Dados das variedades de cana-de-açúcar

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

Fonte 1: Nervis (2015)

Para os testes computacionais também são necessários os dados relacionados à quantidade de variedades de cana-de-açúcar (N), as possibilidades de desvios (Dev), as possibilidades de meses de colheita (M) e meses de plantio (H), quantidade de talhões (K), média da produtividade (S) e as demandas mensais que devem ser atendidas (Dem). Nas quatro instâncias são utilizadas 20 variedades (N = 20), 7 desvios (DEV = -3,...,3), 8 possibilidades de colheita (M = 4,...11) e 6 possibilidades de plantio (H = 1,2,3,4,9,10). Na Tabela 2 são determinados os demais dados para cada uma das quatro instâncias citadas.

Tabela 2- Dados de entrada para os problemas CANA16, CANA30, CANA60 e CANA100

INSTÂNCIA	K	S	Dem
CANA16	16	2000	{5000, 5000, 5000, 6000, 6000, 6000, 5000, 5000}
CANA30	30	2300	{7000, 7000, 7000, 8000, 8000, 8000, 7000, 7000}
CANA60	60	2500	{10500, 10500, 10500, 11500, 11500, 11500, 10500, 10500}
CANA100	100	3000	{13000, 13000, 13000, 14000, 14000, 14000, 13000, 13000}

3.4 Resultados

Os resultados dos testes computacionais realizados são mostrados na Tabela 6. Nesta Tabela para cada instância do problema são apresentados o número de talhões em considerados, o valor da função objetivo e o tempo computacional que *software* levou para resolver o problema.

Tabela 3 - Resultados dos problemas com relação à produção de sacarose

INSTÂNCIA	Nº DE TALHÕES (20 HECT. CADA)	PRODUÇÃO DE SACAROSE (tha⁻¹)	TEMPO COMPUTACIONAL
CANA16	16	46.696,466	00' 51,48''
CANA30	30	84.831,783	01' 32,78''
CANA60	60	162.903,954	06' 01, 60''
CANA100	100	NÃO DETERMINADA	04' 59,07''

As Tabelas 4, 5 e 6 mostram qual a variedade é selecionada para ser plantada em cada talhão, em qual mês é plantada e em qual mês é colhida, para os problemas CANA16, CANA30 e CANA60, respectivamente. Também foram indicados, em relação à colheita, os desvios d do mês de maturação da variedade i colhida no talhão j . Como o *software* não determinou uma solução no problema CANA 100, dentro do limite de desvios permitidos, não constará uma tabela para este.

Tabela 4 - Resultados detalhados do problema CANA16

Talhão <i>(j)</i>	Variedade <i>(i)</i>	Mês de Plantio <i>(h)</i>	Mês de Colheita <i>(m)</i>	Desvio de Colheita <i>(d)</i>
1	7	1	7	0
2	7	4	11	1
3	5	3	9	0
4	5	1	4	-3
5	5	1	7	0
6	5	1	4	-3
7	7	4	10	0
8	10	4	11	1
9	7	2	8	0
10	10	1	5	-2
11	10	1	5	-2
12	5	4	10	0
13	10	1	6	-1
14	7	1	6	-1
15	7	3	9	0
16	5	2	8	0

Tabela 5 - Resultados detalhados do problema CANA30

Talhão <i>(j)</i>	Variedade <i>(i)</i>	Mês de Plantio <i>(h)</i>	Mês de Colheita <i>(m)</i>	Desvio de Colheita <i>(d)</i>
1	14	1	6	-1
2	7	2	8	0
3	10	1	7	0
4	20	10	10	0
5	20	10	10	0
6	15	10	11	1
7	10	1	4	-3
8	14	4	10	0
9	7	4	10	0

10	11	1	5	-2
11	5	1	7	0
12	15	10	11	1
13	17	9	9	0
14	10	1	7	0
15	7	2	8	0
16	11	4	11	1
17	17	9	9	0
18	20	10	10	0
19	5	1	4	-3
20	14	1	6	-1
21	10	1	4	-3
22	7	1	7	0
23	17	10	10	0
24	20	9	9	0
25	17	9	9	0
26	5	2	8	0
27	5	1	7	0
28	14	1	6	-1
29	11	1	5	-2
30	11	1	5	-2

Tabela 6 - Resultados detalhados do problema CANA60

Talhão <i>(j)</i>	Variedade <i>(i)</i>	Mês de Plantio <i>(h)</i>	Mês de Colheita <i>(m)</i>	Desvio de Colheita <i>(d)</i>
1	11	1	5	-2
2	20	10	10	0
3	10	4	10	0
4	15	10	10	0
5	14	4	11	1
6	5	4	10	0
7	10	1	5	-2

8	7	3	9	0
9	10	1	6	-1
10	10	1	7	0
11	14	4	11	1
12	11	1	4	-3
13	20	10	10	0
14	11	1	6	-1
15	20	9	9	0
16	11	4	11	1
17	2	1	4	-3
18	17	10	10	0
19	7	2	8	0
20	5	1	7	0
21	14	3	9	0
22	11	2	8	0
23	2	2	8	0
24	10	4	10	0
25	15	9	9	0
26	1	2	8	0
27	1	3	9	0
28	2	1	4	-3
29	5	4	10	0
30	14	3	9	0
31	11	1	6	-1
32	5	1	5	-2
33	17	9	9	0
34	10	1	5	-2
35	15	10	10	0
36	7	1	7	0
37	7	1	4	-3
38	5	1	7	0
39	15	10	11	1
40	17	10	10	0

41	20	10	10	0
42	15	10	10	0
43	14	1	7	0
44	14	2	8	0
45	1	4	10	0
46	17	10	10	0
47	2	1	7	0
48	2	4	10	0
49	1	1	6	-1
50	7	3	9	0
51	17	10	10	0
52	2	3	9	0
53	7	4	10	0
54	17	10	10	0
55	1	2	8	0
56	20	10	10	0
57	15	10	10	0
58	5	3	9	0
59	20	9	9	0
60	1	1	4	-3

A interpretação dos resultados é feita com base na Tabela 5, referente ao problema CANA30. Essa interpretação pode ser feita de forma análoga para a Tabela 4 e Tabela 6, referentes aos problemas CANA16 e CANA60, respectivamente.

Pode-se observar na Tabela 5 que no talhão 1 a variedade 14 é plantada no mês de janeiro (1) e colhida no mês de junho (6). Como é do tipo cana de ano e meio a sua maturação acontece 18 meses após o plantio. O plantio nesse talhão é em janeiro (1) e sua maturação aconteceria em julho (7). Uma vez que a decisão de colheita é feita para o mês de junho (6), significa que o valor do desvio d é igual a -1, ou seja, a variedade será colhida um mês antes de sua maturação.

De forma análoga, para os 30 talhões j considerados, dentre as 20 possibilidades de variedades, uma única variedade i é selecionada para ser plantada em cada talhão em um mês

h , respeitando-se o limite da quantidade máxima de talhões j em que a variedade i pode ser plantada. Além disso, a Tabela 5 também indica o mês m em que a variedade i deve ser colhida no talhão j , já se considerando o desvio d relativo à sua produtividade máxima.

Observa-se na Tabela 5 que, 18 talhões (talhões 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 27) têm suas respectivas variedades colhidas com um desvio nulo, ou seja, 60% dos talhões têm sua respectiva variedade colhida no seu pico máximo. 6 talhões (talhões 1, 6, 12, 16, 20, 28) têm suas respectivas variedades colhidas com um desvio igual a -1 ou 1, ou seja, 20% dos talhões têm sua respectiva variedade colhida um mês antes ou um mês depois de sua maturação. 3 talhões (talhões 10, 29, 30) têm suas respectivas variedades colhidas com um desvio igual a -2 ou 2, ou seja, 10% dos talhões têm sua respectiva variedade colhida dois meses antes ou dois meses depois de sua maturação. 3 talhões (talhões 7, 19, 21) têm suas respectivas variedades colhidas com um desvio igual a -3 ou 3, ou seja, 10% dos talhões têm sua respectiva variedade colhida três meses antes ou três meses depois de sua maturação.

Uma vez que o canavial é de renovação, o desvio só acontece no mês de colheita. No mês de plantio o desvio é zero.

A partir dos resultados pode-se observar que todas as variedades de cana-de-açúcar selecionadas para o problema CANA16 são do tipo cana de ano e meio. Isso acontece por tratar-se de uma instância menor, em que a seleção priorizou as variedades que são mais produtivas, no caso, as do tipo cana de ano e meio, por permanecerem um tempo maior plantada nos talhões.

Quando comparados os problemas com instâncias maiores nota-se que o *software* é mais eficiente no problema CANA60, pois a proporção de escolhas de desvios iguais a zero para a colheita das variedades é maior do que no problema CANA30. No problema CANA60 existem mais opções para as decisões do momento de colheita e assim a solução determinada é melhor em relação à produção da usina e mais eficiente, uma vez que é possível determinar mais desvios iguais a zero, colhendo-se mais variedades no seu período de máxima maturação.

O desvio tende a ser zero para as variedades que produzem as maiores produtividades, como pode ser visto nos resultados apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, nos talhões em que tiveram a variedade 7 selecionadas para o plantio, a qual é a variedade de maior produtividade em seu período de máxima maturação.

Os resultados obtidos para os problemas CANA16, CANA30 e CANA60, utilizando a implementação feita no *software* CPLEX, validam o modelo proposto e apresentado no

Capítulo 2 deste trabalho.

Esses resultados incentivam a possibilidade de se melhorar a implementação realizada, de tal forma a se buscar e determinar possíveis soluções ao problema CANA100.

Conclusões e Trabalhos futuros

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um novo modelo matemático que objetiva maximizar a produção de sacarose da cana-de-açúcar, definindo qual variedade deverá ser plantada no talhão, e quais os seus meses de plantio e colheita, considerando a possibilidade de obtenção de sua produtividade máxima (desvio nulo), atendendo a uma demanda mensal pré-estabelecida.

As simulações computacionais mostraram que o modelo é capaz de auxiliar na seleção das variedades a serem plantadas nos talhões e no planejamento otimizado da colheita, maximizando a produção de sacarose e atendendo a demanda mensal da usina.

Para estudos futuros será adicionada ao modelo as variedades de cana-de-açúcar que já estão em fase de rebrota no tempo inicial, ou seja, o canavial não será mais uma área de renovação, tornando o problema mais difícil.

Pretende-se também considerar problemas reais relativos às usinas sucroenergéticas, com um número de talhões maior que os considerados nesse trabalho, os quais podem ser formulados a partir do modelo proposto e solucionados através do aperfeiçoamento da implementação realizada.

Trabalhos apresentados e publicados

SOUZA. M. L. P. S. *et al.* *Métodos Híbridos de Pontos Interiores, Branch-and-Bound, da Soma Ponderada e ε -Restrito Canalizado em Problemas Multiobjetivo da Biomassa da Cana-de-Açúcar.* XLVII SBPO, 2015

SOUZA. M. L. P. S.; BALBO. A. R.; FLORENTINO, H. O. *Planejamento do Plantio e Colheita da cana-de-açúcar para o atendimento da demanda mensal de produção de sacarose.* VI Seminário da Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2016

SOUZA. M. L. P. S. *et al.* *Attendance of the sugar and ethanol production monthly goal through optimized planning of sugarcane planting and harvesting.* Workshop on Optimization, Botucatu ,2016

CAVERSAN. A. S. *et al.* *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

Referências bibliográficas

- BARBIERI, V; VILLA NOVA, N. A. *Climatologia e a cana-de-açúcar*. Araras: PLANALSUCAR - Coordenadoria Regional Sul – COSUL. P, 1-22. Climatologia, 1977
- BOLONHEZI, D.; PEREIRA, J. C. V. N. A. *Plantio direto na Alta Mogiana*. O Agrônomo, Campinas, v. 51, p. 12-15, 1999.
- CONAB. *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.
- 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.
- 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
- 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.
- 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 janeiro de 2017.
- LIMA, A. D. (2009). *Otimização do aproveitamento do palhço de cana-de-açúcar*. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.
- 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. 121 f. Dissertação de mestrado. 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, v.23, 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

MILLER, L. C. *Tecnologia agrícola para exploração e manejo cultural de cana-de-açúcar*. Disponível em: <http://www.sigacana.com.br/>. Acesso em: 13 de julho de 2017.

MORÉ, J.J., WRIGHT, S.J. *Optimization Software Guide*. ISPN. Philadelphia, Pennnsylvania. Second Printing. 1994.

NERVIS, J.J. *Planejamento Otimizado da Colheita da cana-de-açúcar e aproveitamento da biomassa*. Tese de doutorado. Energia na Agricultura. Botucatu: UNESP, FCA, 2015.

NOVA CANA, *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 janeiro de 2017

RAMOS, R. P. *Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização*. 69 f. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

RAMOS. R.P. ; ISLER, P. ; FLORENTINO, H. O. ; Jones, Dylan ; 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. *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.

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

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. Publicação N° 031D/2015. 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 Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2011.

TOLENTINO, G. *Programação linear inteira aplicada ao aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2007.

UNICA, *União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, Acompanhamento quinzenal da safra*. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=63> Acesso em: 01 de outubro de 2016.

Anexo A - Programação desenvolvida em ambiente OPL

Para utilização desse software na resolução do modelo, criou-se um projeto em ambiente OPL, no qual foram inseridas todas as informações necessárias do problema: os dados do problema, a função objetivo, as restrições e as variáveis de decisão.

Os dados foram divididos em quatro formas para serem inseridos no software: Limitantes (dimensionamento), Variações de Índices, Conjuntos e Variáveis.

Nos limitantes estão discriminadas as quantidades de variedades de cana-de-açúcar, as quantidades de talhões, a quantidade de desvios permitida nos meses de colheita, o número de meses de plantio, o número de meses de colheita e a porcentagem que limita a quantidade que cada variedade poderá ser plantada.

```

////////LIMITANTES////////////////////////////////////
int N = 20; //variedades
int K = 100; //talhões
int DES = 6; //desvios
int HP = 6; //meses de plantio
int MC = 11; //meses de colheita

```

Em Variações de Índices estão discriminados, respectivamente: as n variedades i tem-se $i = 1, \dots, n$; os k talhões j tem-se $j = 1, \dots, k$; para os meses de plantio tem-se $m_{plantio} = 1, \dots, HP$; para os meses de colheita tem-se $m_{colheita} = 4, \dots, MC$; para os desvios de produtividade máxima tem-se $desvio = 0, \dots, DES$.

```

////////VARIACÕES DE INDICES////////
range variedade = 1..N;
range talhao = 1..K;
range mesdeplantio = 1..HP;
range desvio = 0..DES;
range mesdecolheita = 4..MC;

```

Nos Conjuntos estão discriminados os dados numéricos fornecidos pelo modelo. Nesse modelo existe o Conjunto de Meses de Plantio $H = \{1, 2, 3, 4, 9 \text{ e } 10\}$ o Conjunto de Meses de Colheita $M = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$, o Conjunto de Talhões L (enumera a quantia k de talhões j ($j = 1, \dots, k$) com suas respectivas áreas A_j), o Conjunto de Variedades I (enumera a quantia n de variedades i do modelo ($i = 1, \dots, n$)), o Conjunto de Produtividade PROD por variedade (enumera a produtividades $Prod_i$ de cada variedade i ($i = 1, \dots, n$)), o Conjunto de Demanda Mensal DEMANDA = $\{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ (relativo aos meses de abril (4) a novembro (11)) e o Conjunto de Desvios de Produtividade Máxima dos Meses DEV = $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$.

```

/////////CONJUNTOS/////////
int H[mesdeplantio]= [ 1, 2, 3, 4, 9, 10];
int M[mesdecolheita]= [ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11];
float Prod[variedade] = [129.10, 130.90, 100, 112.30, 165.00, 117.80,
148.20, 113.00, 123.10, 142.40, 133.35, 112.80, 126.70, 136, 132.8, 121.93,
137.9, 89.29, 121.7, 140.2];
float L[talhao] = [20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20];
float Demanda[mesdecolheita]= [10000, 10000, 10000, 11000, 11000, 11000,
10000, 10000];
int Dev[desvio]= [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3];
int I[variedade]= [ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15,
16, 17, 18, 19, 20];

```

Nas Variáveis são discriminadas todas as variáveis consideradas no modelo matemático. As variáveis do modelo são do tipo: binária (que indica se a decisão de plantar/colher ocorreu ou não) ou inteira.

```

//////////VARIÁVEIS//////////
dvar boolean X[variedade][talhao][mesdeplantio][desvio]; //decisão de
plantio
dvar int T0[talhao]; //tempo inicial - plantio
dvar int T1[talhao]; //tempo inicial - colheita
dvar int I0[talhao]; //tempo inicial - Variedade
dvar int M1[talhao]; //tempo inicial - mês de plantio convertido
dvar boolean T[variedade][talhao][mesdecolheita][desvio]; //decisão de
colheita
dvar int D[talhao]; //tempo inicial - desvio
dvar boolean Y [talhao];

```

O modelo matemático, apresentado no Capítulo 3, utilizado para descrever o problema, está descrito a seguir.

```

//Objective function
maximize
sum(i in variedade, j in talhao, d in desvio, m in mesdecolheita) ((((-
0.0243*(Dev[d]^2))+1)*Prod[i])*L[j]*T[i][j][m][d]);
subject to {

    forall(j in talhao)
        sum(i in variedade, h in mesdeplantio, d in desvio:
d==0) (Prod[i]*L[j]*X[i][j][h][d]) >= 2300;

    forall(j in talhao)
        sum(i in variedade, h in mesdeplantio, d in desvio:
d==0) (X[i][j][h][d])==1;

    forall (i in variedade)
        sum(j in talhao, h in mesdeplantio, d in desvio:
d==0) (X[i][j][h][d])<= 6;

```

```

    forall(j in talhao)
        I0[j]== sum(i in variedade, h in mesdeplantio, d in desvio:
d==0) (I[i]*X[i][j][h][d]);

    forall(j in talhao)
        T0[j]== sum(i in variedade, h in mesdeplantio, d in desvio:
d==0) (H[h]*X[i][j][h][d]);

    forall(j in talhao)
        I0[j]== sum(m in mesdecolheita, i in variedade, d in
desvio) (I[i]*T[i][j][m][d]);

    forall(j in talhao)
        sum(i in variedade, m in mesdecolheita, d in
desvio) (T[i][j][m][d])==1;

    forall(j in talhao)
        T1[j]== T0[j] + sum(i in variedade, m in mesdecolheita, d in desvio:
0<i<15) ((18+Dev[d])*T[i][j][m][d]) + sum(i in variedade, m in mesdecolheita,
d in desvio: 14<i) ((12+Dev[d])*T[i][j][m][d]);

    forall (j in talhao)
        T0[j] - 4 <= 6 * (Y[j]);

    forall (j in talhao)
        5 * (Y[j]) <= T0[j];

    forall(j in talhao)
        T1[j]- sum(i in variedade, m in mesdecolheita, d in desvio:
14<i) ((12+Dev[d])*T[i][j][m][d]) - T0[j] <= 1200*(1-Y[j]);

    forall(j in talhao)
        T1[j]-sum(i in variedade, m in mesdecolheita, d in desvio :
0<i<15) ((18+Dev[d])*T[i][j][m][d]) - T0[j] <= 1200*(Y[j]);

    forall(j in talhao)
        D[j]==sum(i in variedade, m in mesdecolheita, d in
desvio) (Dev[d]*T[i][j][m][d]);

    forall(j in talhao)
        M1[j]== T1[j]-12;

    forall(j in talhao)
        M1[j]== sum(m in mesdecolheita, i in variedade, d in
desvio) (M[m]*T[i][j][m][d]);

    forall(m in mesdecolheita)
        sum(i in variedade, j in talhao, d in desvio) (((-
0.0243*Dev[d]^2+1)*Prod[i])*L[j]*T[i][j][m][d]) >= Demanda[m];
}

```