

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita”

Faculdade de Engenharia

Gilmar Tolentino

**Otimização multiobjetivo para o
planejamento integrado do cultivo da
cana-de-açúcar e da cana-energia visando a
produção de sacarose e fibra**

Bauru

2021

Gilmar Tolentino

**Otimização multiobjetivo para o
planejamento integrado do cultivo da
cana-de-açúcar e da cana-energia visando a
produção de sacarose e fibra**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Bauru, Faculdade de Engenharia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Antonio Roberto Balbo

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Sônia Cristina Poltroniere

Bauru

2021

T649o Tolentino, Gilmar
Otimização multiobjetivo para o planejamento integrado do cultivo da cana-de-açúcar e da cana-energia visando a produção de sacarose e fibra / Gilmar Tolentino. -- Bauru, 2021
146 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Antonio Roberto Balbo
Coorientadora: Sonia Cristina Poltroniere

1. Otimização Multiobjetivo. 2. Modelagem matemática e aplicações. 3. Cana-de-açúcar. 4. Cana-energia. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GILMAR TOLENTINO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 30 dias do mês de abril do ano de 2021, às 13:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de GILMAR TOLENTINO, intitulada **OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR E DA CANA-ENERGIA VISANDO A PRODUÇÃO DE SACAROSE E FIBRA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANGELO ALIANO FILHO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Prof. Dr. CARLOS ROBERTO SOUZA CARMO (Participação Virtual) do(a) Faculdade de Ciências Contábeis / Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Profª. Drª. EDILAINE MARTINS SOLER (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Profª. Drª. CAMILA DE LIMA ALMEIDA DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Pesquisa Operacional / Modelagem Matemática / Rúmina Tecnologias para Pecuária S.A.. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO

Dedico a todos os leitores.
Aos meus filhos Gui e Thaisa
Aos meus familiares e amigos.

Agradecimentos

Primeiro agradeço a Deus por todas as coisas, boas e más, vivenciadas por mim. Cada uma delas, ao seu modo, contribuíram para eu chegar até aqui.

Ao meu pai (em memória) e minha mãe que sempre me apoiaram nos estudos.

A minha esposa e aos meus filhos, pela constante presença e por tudo o que representam para mim.

Ao prof Dr. Antonio Roberto Balbo pelo apoio, amizade e por todos ensinamentos compartilhados a mim.

A *prof^a Dr^a* Sônia Cristina Poltroniere Silva pelo apoio, amizade e pelos ensinamentos.

A *prof^a Dr^a* Helenice de Oliveira Florentino Silva pela amizade, apoio e pelos ensinamentos.

Aos professores e professoras participantes da banca de defesa, pelas colaborações e sugestões feitas à melhoria da escrita da tese.

A Associação dos Plantadores de Cana do Médio Tiete e, em especial, ao Elio P. de Camargo pela cordialidade e informações prestadas.

Ao Eng. Agrônomo Marcel Tomás Arantes pelas informações prestadas.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Matemática

pela formação e pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários da Seção Técnica da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia, pela atenção e pronto atendimento.

*“O que impede de saber não são nem o tempo nem a inteligência, mas
somente a falta de curiosidade”*

Agostinho da Silva

Resumo

Este trabalho propõe uma metodologia para a construção de um planejamento otimizado que integre o processo de plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia com o intuito de obter sacarose e fibra dessas culturas para a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade. Neste sentido, são propostos três modelos multiobjetivos que determinam variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, obtendo um calendário de plantio e colheita, visando maximizar a produção de sacarose e fibra e, simultaneamente, minimizar o custo operacional de cultivo. O primeiro modelo multiobjetivo considera o plantio e primeira colheita, obtendo sacarose a partir da cana-de-açúcar e fibra por meio da cana-energia; o segundo modelo multiobjetivo também considera o plantio e primeira colheita, obtendo sacarose e a partir da cana-de-açúcar e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia; o terceiro modelo multiobjetivo considera o plantio e múltiplas colheitas, obtendo sacarose e fibra a partir da cana-de-açúcar e cana-energia. Nos modelos propostos são consideradas restrições técnicas das usinas, como demanda mensal de sacarose e fibra e capacidade de moagem, para cada mês de colheita, em todos os períodos considerados de colheitas. Para a resolução, os modelos multiobjetivos foram transformados pelo método das restrições canalizadas progressivas (MRCP) em um conjunto de problemas mono-objetivos, os quais, foram implementados na linguagem OPL (*Optimization Programming Language*) e resolvidos pelo *software* CPLEX *Optimizer*. Os modelos foram simulados com dados de diferentes instâncias e variedades de cana-de-açúcar e cana-energia e os resultados obtidos mostram um cronograma de plantio e colheita das variedades selecionadas bem como, a produtividade de sacarose e fibra

e o custo de cultivo, colheita e transporte destas plantas, auxiliando o tomador de decisões no planejamento deste processo.

Palavras-chave:: Otimização. Modelagem matemática e aplicações. Modelagem multiobjetivo. Cana-de-açúcar. Cana-energia.

Abstract

This work proposes a methodology for the construction of an optimized planning that integrates the process of planting and harvesting of the sugarcane and energy-cane, in order to obtain sucrose and fiber from these cultures, for the production of sugar, ethanol and bioelectricity. In this sense, multiobjective models are proposed to choose varieties of sugarcane and energy-cane, obtaining a planting and harvesting scheduling, aiming to maximize the production of sucrose and fiber and, simultaneously, minimize the operational cost of cultivation. Three multiobjective models are proposed, of which, the first selects varieties of sugarcane in order to obtain sucrose and varieties of energy-cane for the use of fiber, considering the first harvest of the selected varieties; the second model chooses varieties of sugarcane to obtain sucrose and fiber and, from selected varieties of energy-cane is explored its fiber. This model also considers the first harvest of the selected varieties. The third model selects varieties of sugarcane and energy-cane for the utilization of the sucrose and fiber, considering multiple harvest periods. In the proposed models, technical constraints of the plants are considered, such as monthly demand of the sucrose and fiber and grinding capacity, for each month of harvest, in all considered harvesting periods. For the resolution, the multiobjective models were transformed by the progressive bounded constraints method (PBCM) into a set of mono-objective problems, which were implemented in the OPL (Optimization Programming Language) and solved by the CPLEX Optimizer software. The models were simulated with data from different instances and sugarcane and energy-cane varieties and the results obtained show a schedule of planting and harvesting of selected varieties, as well as the productivity of sucrose and the operational cost of growing, harvesting and transportation these plants, helping the decision maker in planning this process.

Keywords: Mathematical Modeling and Applications. Optimization. Multiobjective Model. Sugarcane. Energy-cane.

Lista de Figuras

2.1	Variedades resultantes do cruzamento e seleção de espécies do complexo <i>Saccharum</i>	34
2.2	Mecanismo de extração da colhedora	38
2.3	Evolução do custo de plantio da cana ao longo das safras	40
5.1	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.3).	66
5.2	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.3) e (5.4).	67
5.3	Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades selecionadas de cana-energia e da cana-de-açúcar no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.6).	68
5.4	Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de colheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.6).	68
5.5	Curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes apresentados na Tabela (5.5).	69
5.6	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.5) e (5.6).	70
5.7	Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades selecionadas de cana-energia e da cana-de-açúcar no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.7).	71
5.8	Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de colheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.7).	71
5.9	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.7).	73
5.10	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.7) e (5.8).	74
5.11	Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades selecionadas de cana-energia e da cana-de-açúcar no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.8).	74

5.12 Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de co-	
lheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do	
modelo mono-objetivo (4.8).	75
5.13 Curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes na Tabela (5.9).	76
5.14 Curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes nas Tabelas (5.9) e (5.10).	77
5.15 Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia	
e da cana-de-açúcar, selecionadas no ponto de compromisso do modelo mono-	
objetivo (4.9).	78
5.16 Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de co-	
lheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do	
modelo mono-objetivo (4.9).	78
5.17 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.12).	80
5.18 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.12) e (5.13).	81
5.19 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.14).	82
5.20 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.14) e (5.15).	83
5.21 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.16).	84
5.22 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.16) e (5.17).	85
5.23 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.18).	86
5.24 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.18) e (5.19).	87
5.25 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.20).	88
5.26 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.20) e (5.21).	89
5.27 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.22).	90
5.28 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.22) e (5.23).	91
5.29 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.24).	92
5.30 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.24) e (5.25).	93
5.31 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.26).	94
5.32 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.26) e (5.27).	95
5.33 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.28).	96
5.34 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.28) e (5.29).	97
5.35 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.30).	98
5.36 Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.30) e (5.31).	99
5.37 Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia	
na instância com 30 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo	
mono-objetivo (4.10).	100

5.38	Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 30 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.11).	100
5.39	Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar nos meses destinado ao plantio no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).	101
5.40	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do primeiro período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	101
5.41	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do segundo período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	102
5.42	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do terceiro período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	102
5.43	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do quarto período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	103
5.44	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.33).	105
5.45	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.34).	106
5.46	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.34) e (5.35).	107
5.47	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.36).	108
5.48	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.37).	109
5.49	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.37) e (5.38).	110
5.50	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.39).	111
5.51	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.40).	112
5.52	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.40) e (5.41).	113
5.53	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.42).	114
5.54	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.43).	115
5.55	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.43) e (5.44).	116
5.56	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.45).	117
5.57	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.46).	118
5.58	Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.46) e (5.47).	119

5.59	Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 65 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.10).	120
5.60	Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 65 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.11).	120
5.61	Porcentagem de talhões da instância com 65 talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar nos meses destinado ao plantio no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).	121
5.62	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do primeiro período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	121
5.63	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do segundo período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	122
5.64	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do terceiro período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	122
5.65	Porcentagem de talhões colhidos nos meses do quarto período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).	123
A.1	Comparação de vetores em duas variáveis	142
A.2	Conceito de dominância	142
A.3	Pontos notáveis de um problema multiobjetivo ($r = 2$)	144

Lista de Tabelas

2.1	Exportações de açúcar e etanol nos anos de 2005 a 2020	32
2.2	Comparativo de cana-de-açúcar e cana-energia	34
2.3	Ciclo padrão do corte da cana	37
2.4	Valores de colheita, transporte e transbordo da cana na safra 2016/2017 no estado de São Paulo	40
5.1	Produtividade, porcentagem de sacarose e fibra das variedades de cana-energia em cana planta	64
5.2	Produtividade, porcentagem de sacarose e fibra das variedades de cana-de-açúcar em cana planta	64
5.3	Resultados em cada subintervalo obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.6) na instância com 30 talhões	65
5.4	Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.6) para a instância com 30 talhões	66
5.5	Resultados em cada subintervalo obtidos por meio da resolução modelo mono-objetivo (4.7) na instância com 30 talhões	69
5.6	Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.7)	70
5.7	Resultados obtidos em cada subintervalo por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.8) na instância com 65 talhões	72
5.8	Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.8) para a instância com 65 talhões	73
5.9	Resultados em cada subintervalo por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.9) na instância com 65 talhões	76

5.10 Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo	
(4.9) para a instância com 65 talhões	77
5.11 Pontos lexicográficos e amplitudes para cada colheita da instância com 30 talhões .	79
5.12 Resultado para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo	
mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.	80
5.13 Resultados para o plantio e primeira nas partições com a resolução do modelo	
mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões	81
5.14 Resultado para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo	
mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões	82
5.15 Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) no	
plantio e primeira colheita da instância com 30 talhões.	83
5.16 Resultado para a segunda colheita com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10)	
na instância com 30 talhões	84
5.17 Resultados da segunda colheita nas partições com a resolução do modelo mono-	
objetivo (4.10) na instância com 30 talhões	85
5.18 Resultado para a segunda colheita da resolução do modelo mono-objetivo (4.11)	
na instância com 30 talhões	86
5.19 Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na	
segunda colheita da instância com 30 talhões.	87
5.20 Resultado para a terceira colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-	
objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.	88
5.21 Resultados da terceira colheita nas partições com a resolução do modelo mono-	
objetivo (4.10) na instância com 30 talhões	89
5.22 Resultado para a terceira colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-	
objetivo (4.11) na instância com 30 talhões.	90
5.23 Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na	
terceira colheita da instância com 30 talhões.	91
5.24 Resultado para a quarta colheita com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10)	
na instância com 30 talhões.	92
5.25 Resultados da quarta colheita nas partições com a resolução do modelo mono-	
objetivo (4.10) na instância com 30 talhões	93
5.26 Resultado para a quarta colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-	
objetivo (4.11) na instância com 30 talhões.	94

5.27 Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na quarta colheita da instância com 30 talhões.	95
5.28 Resultados em cada subintervalo considerando as quatro colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.	96
5.29 Resultados considerando as quatro colheitas nas partições com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões	97
5.30 Resultados em cada subintervalo considerando as quatro colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões.	98
5.31 Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) considernado todas as colheitas da instância com 30 talhões.	99
5.32 Pontos lexicográficos e amplitudes para cada colheita da instância com 65 talhões .	103
5.33 Resultados para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões	104
5.34 Resultado para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	105
5.35 Resultados do plantio e primeira colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	106
5.36 Resultado para segunda colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões	107
5.37 Resultado para a segunda colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	108
5.38 Resultados da segunda colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	109
5.39 Resultado para terceira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões	110
5.40 Resultados para a terceira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	111
5.41 Resultados da terceira colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	112
5.42 Resultado para quarta colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões	113
5.43 Resultados para a quarta colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões.	114

5.44 Resultados da quarta colheita para os novos subintervalos com a resolução do	
modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	115
5.45 Resultados considerando todas as colheitas obtidos com a resolução do modelo	
mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões	117
5.46 Resultados considerando todas colheitas na instância com 65 talhões, obtidos com	
a resolução do modelo mono-objetivo (4.11).	118
5.47 Resultados de todas as colheitas para os novos subintervalos com a resolução do	
modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões	119

Lista de Abreviaturas e Unidades

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAR	Medida de pressão
Bit	Binary Digit
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CO ₂	Dióxido de carbono
CTT	Corte, Transporte e Transbordo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GWh	Gigawatt-hora
IBM	International Business Machines Corporation
kg	Quilogramas
km	Quilômetros
m	metros
MRCP	Método das Restrições Canalizadas Progressivas
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
OPL	Optimization Programming Language
POL	Teor de sacarose aparente da cana
RAM	Random Access Memory
R\$	Reais
R\$/t	Reais por tonelada
SIN	Sistema Interligado Nacional
US\$	Dólar
t/ha	toneladas por hectare
UNICA	União das indústrias de cana-de-açúcar

Sumário

1. Introdução	25
1.1 Revisão bibliográfica - Modelagem no setor sucroenergético	27
1.2 Organização da tese	30
2. Produção da cana-de-açúcar e cana-energia	31
2.1 O setor sucroenergético no Brasil	31
2.2 A cana-energia	32
2.3 O plantio e colheita de cana	35
2.4 Variedades de cana	38
2.5 Custos operacionais da cana	39
2.6 Cogeração de energia através da fibra de cana	41
3. Modelos propostos para a escolha das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia	43
3.1 Primeiro modelo multiobjetivo	43
3.2 Segundo modelo multiobjetivo	48
3.3 Terceiro modelo multiobjetivo	49
4. Metodologia de solução para os modelos multiobjetivos propostos	55
4.1 Definições e conceitos	55
4.2 Método das restrições canalizadas progressivas	57
4.3 Primeiro modelo multiobjetivo representado na forma mono-objetivo	59
4.4 Segundo modelo multiobjetivo representado na forma mono-objetivo	60
4.5 Terceiro modelo multiobjetivo representado na forma mono-objetivo	60
4.6 Refinamento do MRCP	61

5. Resultados da simulação computacional dos modelos	63
5.1 Dados para testes computacionais	63
5.2 Resultados do primeiro modelo multiobjetivo	65
5.2.1 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.6)	65
5.2.2 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.7)	68
5.3 Resultados do segundo modelo multiobjetivo	71
5.3.1 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.8)	72
5.3.2 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.9)	75
5.4 Resultados do terceiro modelo multiobjetivo	78
5.4.1 Pontos lexicográficos para cada período de colheita na instância com 30 talhões	79
5.4.2 Resultados do plantio e primeira colheita na instância com 30 talhões	79
5.4.3 Resultados da segunda colheita na instância com 30 talhões	83
5.4.4 Resultados da terceira colheita na instância com 30 talhões	87
5.4.5 Resultados da quarta colheita na instância com 30 talhões	91
5.4.6 Resultados considerando as quatro colheitas na instância com 30 talhões.	95
5.4.7 Variedades selecionadas, meses de plantio e meses de colheita para cada período de colheita da instância com 30 talhões no ponto de compromisso	99
5.4.8 Pontos lexicográficos para cada período de colheita na instância com 65 talhões	103
5.4.9 Resultados do plantio e primeira colheita na instância com 65 talhões	104
5.4.10 Resultados da segunda colheita na instância com 65 talhões.	107
5.4.11 Resultados da terceira colheita na instância com 65 talhões	110
5.4.12 Resultados da quarta colheita na instância com 65 talhões	113
5.4.13 Resultados considerando todas as colheitas da instância com 65 talhões.	116
5.4.14 Variedades selecionadas, agenda de plantio e colheita para cada colheita da instância com 65 talhões no ponto de compromisso	120
6. Conclusão e propostas futuras	124
6.1 Trabalhos apresentados em eventos e publicações	125
Apêndice	137
A. Conceitos e definições de problemas multiobjetivos	139
A.1 Definições e conceitos de OM	139

Introdução

A questão energética tem sido um dos maiores problemas mundiais, devido ao inevitável esgotamento das fontes de energia fósseis usadas em larga escala atualmente. Assim, tem-se buscado fontes de energia alternativas como a geração de energia a partir da biomassa, que tem apresentado crescimento por ser uma fonte renovável, limpa e eficiente.

Considerando as vantagens ambientais, sociais e estratégicas das fontes de energias renováveis, estas apresentam duas dificuldades a saber: investimento inicial elevado e, em muitos casos, a intermitência, como no caso da energia eólica e solar. No caso da biomassa, não existe o problema de intermitência, sendo que esta pode ser armazenada e com custo de geração de energia inferior aos das outras fontes renováveis (GOLDEMBERG, 2003)

Para o Brasil que é um grande produtor mundial de cana-de-açúcar, o bagaço (biomassa obtida a partir da cana-de-açúcar pela separação do caldo e da fibra mediante o processo de moagem) vem sendo utilizado para cogeração de energia, obtendo cada vez mais participação na matriz energética nacional.

Nos últimos anos, a cana-de-açúcar tem destacado tanto no mercado interno quanto no externo, principalmente pela produção do etanol e pela cogeração de energia através do bagaço e resíduos de colheita (ponta e plaha da cana). Como decorrência, a demanda de cana-de-açúcar tem aumentado cada vez mais e, portanto, faz-se necessário aumentar sua produção, melhorando sua produtividade, o que implica em um planejamento adequado no sistema de cultivo desta planta (RAMOS, 2014).

Segundo Dantas Filho (2009), o setor sucroenergético, por meio de seus produtos, tais como, o etanol, açúcar e a cogeração de energia, contribuem para a diminuição do efeito estufa por meio de projetos regidos pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kyoto. Isso porque vendem seus excedentes de energia para a rede elétrica nacional, deslocando e substituindo parte da geração de energia fóssil como, por exemplo, as usinas termoeletricas, cujo consumo de combustíveis fósseis seria muito maior sem esta contribuição. O chamado mercado

de créditos de carbono contribui para tornar mais atrativos os projetos de cogeração com a fibra, viabilizando, em muitos casos, o aumento de produção de energia renovável e a diminuição do uso dos combustíveis fósseis.

Segundo Matusoka *et. al.* (2016) a cogeração de eletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar trouxe maior destaque à esta cultura, ganhando valor como matéria-prima alternativa energética. Ainda segundo estes autores, visando o mercado de cogeração da energia elétrica através do bagaço e resíduos de colheita, está em experimento uma nova espécie de cana, denominada cana-energia, que prioriza mais a fibra, ou seja, com maior potencial energético, resultando em uma cana com alta capacidade produtiva e mais resistente a pragas.

A produção por hectare da cana-energia pode ser o dobro da obtida com a cana-de-açúcar com teor de fibras de aproximadamente 30%, sendo o teor médio de fibra da cana-de-açúcar por volta de 15%. Devido a essa característica, a variedade pode ser usada como matéria-prima para a produção de bioquímicos e biocombustíveis de segunda geração, além da cogeração de eletricidade. Outra característica importante é que, por ser extremamente rústica, a cana-energia pode ser plantada em áreas mais restritivas, como em ambientes degradados ou com menor oferta hídrica, sem a necessidade de concorrer com a produção de alimentos (GUARDABASSI, 2006)

Levando em consideração todo cenário do setor sucroenergético, além da bioeletricidade, a cana-de-açúcar e cana-energia devem atender também a produção de açúcar e etanol e, para isso, é necessário considerar o período de plantio e colheita, a escolha das variedades de cana com alta produção de sacarose e fibra, com melhor adaptação ao clima da região de plantio, além dos requisitos necessários para a colheita mecanizada, usada em grande escala atualmente.

Assim, a escolha da variedade da cana interfere diretamente na produção, produtividade, longevidade, custos e, conseqüentemente, lucratividade. Segundo Espinoza (2012) as variedades escolhidas devem apresentar alto índice de produtividade, elevado teor de açúcar, boa capacidade de rebrota, sem florescimento ou fechamento, fácil despalha, resistência a pragas e doenças, bom perfilhamento, difícil tombamento, produção de fibra nas especificações recomendadas, levar em consideração as exigências do clima e solo onde serão cultivadas e período de maturação. A boa qualidade das mudas é o fator que interfere na produção de mais baixo custo e de maior retorno econômico proporcionado ao agricultor.

Além disto, a escolha da variedade pode otimizar os custos de cultivo, uma vez que, nos últimos anos ocorreu aumento no custo de cultivo da cana-de-açúcar e um dos motivos é a diminuição da produtividade. Toda redução na produtividade gera uma concentração de despesas, conseqüentemente ocorre um aumento nos custos por tonelada produzida (BIGATON *et. al.*, 2017).

Assim, as contribuições do trabalho resumem-se em: i) proposição de três modelos multi-objetivos para planejamento da escolha de variedades de cana-de-açúcar e cana-energia para o plantio e colheita, levando em consideração o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte; ii) adaptação do método MRCP à resolução desses modelos; iii) testes numéricos com instâncias reais para investigar sua confiabilidade.

A seguir, são citados alguns trabalhos divulgados na literatura, com modelos que abordam problemas de planejamento no setor sucroenergético, aos quais os modelos propostos neste trabalho foram baseados.

1.1 Revisão bibliográfica - Modelagem no setor sucroenergético

Muitos dos problemas elencados sobre planejamento no setor sucroenergético podem ser modelados matematicamente e resolvidos através de técnicas de otimização afim de auxiliar nas tomadas de decisões.

Homem *et. al.* (2011) propuseram a utilização do método de ponto interior e do método *branch-and-bound* em modelos multiobjetivos relacionados ao aproveitamento do palhço de cana-de-açúcar com o objetivo de reduzir o custo e aumentar o balanço energético da biomassa residual, os quais são conflitantes.

Furlan *et. al.* (2012) desenvolveram um modelo de otimização com dados de uma biorrefinaria integrada, que avalia as demandas do processo e determina uma solução viável para o conflito de interesses entre a produção de etanol de segunda geração e a autossuficiência energética, levando em consideração, dentre os critérios de decisão, qual quantidade de bagaço deve ser separado para a produção de vapor e eletricidade ou síntese de etanol celulósico, dependendo do cenário econômico vigente.

Em Ramos (2014), foram propostos dois modelos de otimização para auxiliar o planejamento da produção de cana-de-açúcar. O primeiro consiste em planejar, de forma otimizada, a divisão da área de plantio em talhões, visando o máximo rendimento da colhedora. O segundo consiste em escolher a variedade que deve ser plantada em cada talhão e determinar em qual período do ano deve-se fazer o plantio e colheita, maximizando a produção total ao longo de quatro cortes. Ramos *et. al.* (2016) propuseram um modelo de otimização garantindo que a colheita da variedade de cana-de-açúcar deve acontecer no período ideal de colheita (máxima produtividade de sacarose), garantindo as restrições impostas pela usina.

Lima *et. al.* (2017) apresentaram nova abordagem de solução para o modelo multiobjetivo referentes à maximização do balanço de energia relativo ao aproveitamento do palhço da cana-

de-açúcar e minimização do custo de colheita da cana-de-açúcar e do palhço, considerando áreas mecanizáveis e semimecanizáveis, considerando o desenvolvimento de métodos híbridos, envolvendo os métodos de otimização multiobjetivo, de pontos interiores e de programação inteira binária.

Nervis *et. al.* (2017) abordaram um planejamento otimizado que constrói uma agenda do período de colheita da cana-de-açúcar que visa a maximização da produtividade de sacarose e a produção de cana-de-açúcar, respeitando todas as restrições impostas pela usina. Foram planejados os períodos de colheita dos talhões de uma unidade agrícola alcançando a máxima produção de sacarose em um planejamento de quatro anos.

Souza (2017) apresentou um modelo de otimização que escolhe variedades de cana-de-açúcar com objetivo de melhorar o planejamento do plantio e de colheita, visando a maximização da produção de sacarose, a partir de demandas mensais da usina. Caversan (2017) propõe um modelo de otimização que seleciona variedades de cana-de-açúcar e cana-energia de forma a maximizar a produção de sacarose proveniente da cana-de-açúcar e bagaço obtido da cana-energia, atendendo as demandas mensais impostas pela usina. Os modelos propostos em Ramos (2014), Nervis (2015), Souza (2017) e Caversan (2017) destinam-se a determinar as variedades que serão plantadas e também criam uma agenda de plantio e colheita, considerando o desvio do mês ideal de colheita das variedades para atender as demandas da usina.

Florentino *et. al.* (2018) propuseram uma metodologia para auxiliar no planejamento na colheita da cana-de-açúcar, afim de melhorar a produção de POL (teor de sacarose aparente na cana) e a qualidade da matéria-prima, considerando as restrições impostas pela usina. Assim, foi proposto um modelo multiobjetivo com o intuito de otimizar o plano de colheita da cana-de-açúcar de modo que a colheita seja o mais próximo possível do pico de maturação, maximizando assim, a produção de POL e, simultaneamente, minimizar o remanejamento das máquinas de colheita.

Em Junqueira e Morabito (2019) foi proposto abordagens de otimização para lidar com a programação e sequenciamento das frentes de colheita da cana-de-açúcar em um horizonte de planejamento dividido em períodos. Tais abordagens foram baseadas em modelos de programação inteira mista para o problema geral de loteamento e escalonamento com linhas de produção paralelas, visando o equilíbrio entre os recursos produtivos e as capacidades de colheita e transporte. Os autores apresentaram uma metodologia de solução heurística para lidar com o modelo para instâncias de problemas reais, baseada em relax-and-fix e fix-and-Optimize.

Em Florentino *et. al.* (2020) foi proposto um modelo matemático integrado para cronograma de plantio e colheita da cana-de-açúcar, visando maximizar a produção total, permitindo desvios

no período de colheita. O modelo foi resolvido usando técnicas exatas de programação inteira para pequenas e médias instâncias e os autores propuseram uma heurística híbrida baseada em algoritmos genéticos para resolver problemas de grande porte.

Poltroniere *et. al.* (2021) propuseram um novo modelo de otimização linear inteira mista para o planejamento integrado do plantio e colheita da cana-de-açúcar e cana-energia, visando manter o compromisso com a produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar, enquanto a cana-energia auxilia na produção de energia e etanol de segunda geração. O modelo considera um período de colheita flexível para atender às demandas do mercado consumidor e respeitar as restrições operacionais da empresa, que podem causar variações na produtividade. Uma heurística baseada nas técnicas relax-and-fix e relax-and-optimize foi proposta para resolver problemas de grande escala, que não podem ser resolvidos por métodos exatos de otimização inteira mista.

Estes problemas de decisão, em geral, são de programação inteira com grande número de variáveis de decisão e restrições, sendo de difícil resolução e, neste caso, procedimentos que exploram métodos determinísticos (BAZARAA *et. al.*, 2006) ou meta-heurísticos (GOLDEBERG, 1989) poderão ser investigados para sua resolução.

Como exemplos, Ramos *et. al.* (2016) e Nervis *et. al.* (2017) propuseram algoritmos genéticos para resolver os modelos por eles propostos. Explorando métodos determinísticos, Lima *et al.* (2017), Souza (2017) e Caversan (2017) determinaram as soluções dos modelos propostos através de implementação computacional de métodos determinísticos ou uso de pacotes computacionais como, por exemplo, o CPLEX.

Unindo as boas características apresentados nos trabalhos de Caversan (2017), Souza (2017), Nervis *et. al.* (2017), Ramos *et. al.* (2016), Florentino *et. al.* (2018), Junqueira e Morabito (2019), Florentino *et. al.* (2020) e Poltroniere *et. al.* (2021), este trabalho propõe três modelos multiobjetivos integrados para escolha de variedades de cana-de-açúcar e cana-energia a serem plantadas, de forma a maximizar a produção de sacarose e fibra e, simultaneamente, minimizar o custo operacional de cultivo. A evolução destes modelos em relação aos anteriormente citados é que, além de escolherem as variedades de cana-de-açúcar e cana-energia com o intuito de maximizar a produção de sacarose e fibra, estes visam a minimização do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, os quais são conflitantes (aumentando a produção de sacarose e fibra, aumenta também o custo operacional de cultivo e, diminuindo o custo, a produção de sacarose e fibra também diminui) e requerem a utilização da otimização multiobjetivo à sua análise.

Para os modelos apresentados, as soluções eficientes foram determinadas pelo Método de Restrições Canalizadas Progressivas (MRCP) conforme Gonçalves et al (2019), com adaptações para modelos multiobjetivos com variáveis de decisão binárias. O MRCP transforma o problema

multiobjetivo em um conjunto de sub-problemas mono-objetivos, otimizando uma das funções objetivo, enquanto as outras são inseridas no conjunto das restrições por meio de canalizações definidas por limitantes inferior e superior pré-definidos, possibilitando a investigação das soluções ótimas destes por métodos determinísticos ou metaheurísticos.

As variáveis de decisão dos modelos multiobjetivos propostos são binárias e, dependendo do número de talhões e variedades de cana-de-açúcar e cana-energia a serem analisadas, os modelos podem apresentar grande quantidade de variáveis, tornando ainda mais complexa a obtenção de pontos eficientes por métodos exatos. Devido a estas restrições, os testes foram realizados com 25 variedades de cana-de-açúcar e cana-energia em instâncias de 30 e/ou 65 talhões.

1.2 Organização da tese

O trabalho está organizado como segue: no Capítulo 2 são apresentadas considerações sobre o setor sucroenergético no Brasil, o plantio e colheita da cana e a cogeração da energia com o aproveitamento do bagaço da cana; o Capítulo 3 apresenta os três modelos multiobjetivos propostos; no Capítulo 4 são apresentadas as definições do modelo multiobjetivo e o método das restrições canalizadas progressiva (MRCP) aplicado aos modelos multiobjetivos propostos; no Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos por meio da simulação dos modelos propostos em instâncias com variedades de cana-de-açúcar e cana-energia. E, em seguida, são apresentadas as conclusões gerais, propostas futuras e os trabalhos já apresentados e publicados.

Produção da cana-de-açúcar e cana-energia

São apresentados a seguir uma revisão bibliográfica do setor sucroenergético brasileiro, abrangendo as formas de plantio e colheita da cana, uma breve descrição da cana-energia, a importância da escolha da variedade e a cogeração de energia através do bagaço da cana.

2.1 O setor sucroenergético no Brasil

A cultura da cana-de-açúcar brasileira desenvolveu-se gradativamente, modificando o cenário econômico nacional propiciando elevados lucros com a exportação realizada dos produtos oriundos desta planta para economia, evidenciando-se como um importante abastecedor das necessidades açucareiras em praticamente todo o mundo (MILANEZ *et al.*, 2010).

Com a crise petróleo, entre as décadas de 70 e 80, o Governo Federal criou o “Projeto Proálcool”, fazendo com que número de destilarias aumentassem, a maioria produtora de etanol a partir da cana-de-açúcar (SZMRECSANYI *et al.*, 2008). Nesta época, a produção de etanol no Brasil cresceu significativamente, resultando nos primeiros 10 anos do programa um crescimento de 35% ao ano, além de consolidar-se como o segundo maior exportador de açúcar do mundo, precedido apenas por Cuba. (SILVA, 2007).

Na década de 90, uma nova geração de produtores de cana passou a operar o negócio com outra visão da produção e de mercado. De 2000 a 2005, as exportações brasileiras cresceram de 258 milhões de litros de álcool para 2,4 bilhões, e as receitas, de 33 milhões de dólares para quase meio bilhão por ano. O açúcar brasileiro já movimentou 70% dos contratos na bolsa de mercadorias de Nova York. As exportações de açúcar atingiu 20,5 milhões de toneladas em 2015, conforme apresentado na Tabela (2.1).

Tabela 2.1 - Exportações de açúcar e etanol nos anos de 2005 a 2020

Anos	Total exportados
Exportações de açúcar	(em milhões de toneladas)
2005	16
2010	18,1
2015	20,5
2020	19,32
Exportações de etanol	(em bilhões de litros)
2005	2,7
2010	4,3
2015	6,9
2020	5,8

Fonte:UNICA (2020)

O Brasil conta hoje com 434 sucroenergéticas, das quais, 263 delas estão localizadas na região Centro-Sul, todas autossuficientes em energia elétrica, graças à cogeração através do bagaço. Porém, somente 88 unidades comercializam os seus excedentes de energia elétrica no mercado, sendo 54 centrais de cogeração exportando eletricidade para a rede de transmissão no estado de São Paulo e 34 centrais em outros 11 estados brasileiros, o que ainda é muito pouco, dado tanto a importância e tamanho do setor sucroenergetico na economia, quanto às necessidades socioeconômicas do Brasil (NOVACANA, 2020).

2.2 A cana-energia

A cana-energia é originária do melhoramento genético de espécies selvagens (*Sarcharum es-pontaneum* e *sarcharum robustum*) com híbridos comerciais de cana-de-açúcar, obtendo assim, uma cana com alto teor de fibra, alto nível de perfilhamento e alta produção de biomassa (BAIÃO,2004).

A ideia do aproveitamento da cana-de-açúcar como planta energética originou-se por volta dos anos 70. Demonstrou-se, naquela época, que, além da utilização para a produção de açúcar e etanol, como estava fazendo o Brasil, a cana-de-açúcar poderia ser aproveitada como planta produtora de biomassa para fins energéticos (ALEXANDER, 1985).

Sendo a fibra um composto carbônico, ocorreu a possibilidade de aumentar a produtividade em maior porcentagem do que com a cana-de-açúcar, mesmo com a diminuição da porcentagem no teor de sacarose (ALEXANDER, 1985; GILMAVA *et al.*, 1984). Esse novo tipo de cana foi chamado de cana-energia. Assim, Alexander(1985) demonstrou que, com uma redução de 25 a

35% na sacarose, ocorreria um aumento de mais de 100% no total da biomassa, se a colheita fosse de cana integral.

A produção de mais fibra com a redução de sacarose traz uma série de vantagens econômicas e ambientais: as plantas são menos exigentes em solo, clima, água e nutrientes e mais resistentes a pragas e doenças, resultando maior eficiência energética no seu cultivo, se considerada toda a cadeia produtiva. Este é um parâmetro essencial e finalista que determinará as opções energéticas a serem consideradas, sendo que a preservação ambiental e a sustentabilidade devem ser levadas em consideração no processo (JOHNSON *et al.*, 2007; HILL *et al.*, 2006).

Por outro lado e como já citado, a redução de sacarose ocorrida na cultura da cana-energia pode não ser de interesse se o objetivo principal é a de aumentar a produção de açúcar, que é mais produtivo na cultura de cana-de-açúcar. Por isso, uma combinação dessas duas culturas em modelos multiobjetivos é o foco principal desse trabalho.

Assim, a cana-energia pode ser plantada em áreas de solo e clima piores do que aqueles reservados para a produção de alimentos, requerendo menos aplicação de fertilizantes e defensivos. Além disso, essas plantas podem conter a erosão dos solos bem como, auxiliar na recuperação daqueles degradados, em razão do seu vigoroso e abundante sistema radicular fasciculado e, devido ao vigor das socas, permitem maior número de cortes (JOHNSON *et al.*, 2007).

A cana-energia colhida em ciclos anuais aumenta sua produtividade nas próximas socas ou se mantém estável, na pior das hipóteses, durante pelo menos seis cortes, como destacou Giamalva *et al.* (1984). Graças ao vigoroso rizoma de *S. spontaneum*, característica que os pioneiros melhoristas de cana-de-açúcar buscaram nessa espécie como complemento à vulnerabilidade da espécie *S. officinarum*, pode-se chegar de 10 a 12 socas.

Uma fonte de energia alternativa econômica de longo prazo deve estar disponível durante todo ano. A maioria das culturas anuais são sazonais e tem disponibilidade de curta duração. Isso ocorre até mesmo com a cana-de-açúcar que segue um cronograma de colheita controlado pelo pico de maturação. Como no caso da cana-energia o interesse maior é o teor de fibra, quanto mais tempo ficar no campo, maior será a quantidade de fibra disponível na planta. Assim a cana-energia pode ser mantida no campo e colhida quando for necessário seu uso (KNOL *et al.*, 2013).

Segundo a Unica (2020), na safra 2019/20, a produtividade agrícola na região centro-sul atingiu 86,3 toneladas por hectare, um aumento de 3,4% em relação a safra anterior. Utilizando a mesma área plantada, a cana-energia oferece uma produção de etanol 232% maior, além de um aumento na produção de energia elétrica através da fibra (NOVACANA, 2020).

Apesar de ser desejável para os dias atuais, o elevado teor de fibra na cana traz problemas

para a potência das moendas instaladas nas usinas que não é suficiente para a moagem de cana com teor de fibra acima de 20%. As saídas passam a ser moendas com maior potência de moagem, mistura da cana-energia com cana-de-açúcar ou, o desenvolvimento de uma variedade intermediária com teor de fibra menor. Este é um dos motivos por que os principais programas de desenvolvimento da cana-energia estão apostando em dois tipos de cana-energia. A cana-energia tipo 1 possui teores de fibras inferiores a 20%, mantendo os níveis de açúcar acima dos 13%. Já a cana-energia tipo 2 possui baixo nível de açúcar (sacarose menor que 6%) e alto teor de fibra, podendo ultrapassar 30%. Neste trabalho a cana-energia considerada para aplicação dos modelos é a do tipo 2. A Figura (2.1) apresenta o colmo de variedades de cana-de-açúcar e cana-energia selvagem, cana-de-açúcar tradicionalmente plantada e a cana-energia tipo I.

Figura 2.1: Variedades resultantes do cruzamento e seleção de espécies do complexo *Saccharum*



Fonte: Novacana (2016)

A Tabela (2.2) mostra uma comparação entre a produtividade da cana-de-açúcar e da cana-energia.

Tabela 2.2 - Comparativo de cana-de-açúcar e cana-energia

Características	cana-de-açúcar	cana-energia
Fibra	17,4%	27%
Açúcares	12,6%	8,5%
Produtividade (massa verde t/ha)	92	180
Produtividade (fibra t/ha)	16	48,6
Produtividade (açúcares t/ha)	11,6	15,3
Ganho genético (ao ano)	2%	5%
Exigência em fertilidade	alta	média
Resistência a pragas e doenças	baixa	média
Colheitas (por ciclo)	5	10

Fonte: Novacana (2016)

Matsuoka et al (2012), afirmam que o cultivo, manejo, colheita e transporte da cana-energia são semelhantes da cana-de-açúcar. Dependendo do período de plantio, esta pode ser “cana de

ano” ou “cana de ano e meio”. A colheita ocorre nos mesmos meses destinada a cana-de-açúcar no período de safra.

2.3 *O plantio e colheita de cana*

Conforme a Unica (2020) a área de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil na safra 2019/2020 foi de 10,18 milhões hectares, sendo o estado de São Paulo o maior produtor brasileiro, com 5,6 milhões de hectares aplicados a esta cultura.

Para Beauclair e Scarpari (2006) o plantio constitui uma das partes mais importantes no desenvolvimento de qualquer cultura, sendo a base de um bom desenvolvimento. O plantio influencia diretamente na alta produtividade da cultura e, também, na redução nos custos de produção (JANINI, 2007).

A importância das operações no plantio exige bom planejamento e muito conhecimento técnico. Todas as decisões nesta fase vão influenciar todo o ciclo da cultura, uma vez que o processo de plantio destaca-se pelos custos elevados (COLETI; STUPELLO, 2006). A implantação de uma lavoura de cana envolve um série de cuidados por se tratar de uma cultura semiperene. O sucesso da colheita depende da qualidade do plantio, além disto, a longevidade do canavial depende da interação entre estas duas operações.

Dentre os fatores da qualidade do plantio, destacam-se: densidade, preparo do solo, época de plantio, escolha da variedade, qualidade e idade da muda e o paralelismo das fileiras de plantio (FRASSON, 2007).

Na região Centro-Sul do Brasil, o plantio da cana-de-açúcar ocorre nos meses de janeiro a março e nos meses de setembro a outubro. Se a cana for plantada de janeiro a março, seu desenvolvimento dura por volta de 18 meses, passando a se chamar “cana de ano e meio” e se for plantada nos meses de setembro a outubro, geralmente é colhida em aproximadamente 12 meses, denominando-se por isso, “cana de ano” (ANJOS; FIGUEIREDO, 2010).

Ainda conforme Anjos e Figueiredo (2010), na região Nordeste o plantio da “cana de ano e meio” é realizado de maio a agosto e o plantio da “cana de ano” ocorre entre setembro e início de janeiro.

Rodrigues (1995) afirma que “cana de ano”, plantada nos meses de setembro e outubro, na região Centro Sul, tem crescimento máximo nos meses de novembro a abril, diminuindo a partir daí devido às condições climáticas adversas ao seu desenvolvimento e, neste caso, a colheita pode ser feita a partir de julho. Para a “cana de ano e meio”, plantada de janeiro ao início de abril, apresenta baixo crescimento de maio a setembro em função do inverno, com fase de maior

crescimento nos meses de outubro a abril, intensificando a partir de dezembro.

Segundo a Embrapa(2013), o plantio da cana-de-açúcar no Brasil pode ser feita de forma manual ou mecanizada e para sua implantação, deve-se fazer, inicialmente, o planejamento da área, realizando um levantamento topográfico. Nos locais de plantio é feito uma sistematização do terreno, no qual subdivide-se a área em talhões e aloca-se os carregadores principais e secundários. Em geral, os talhões são subdivididos quanto à topografia e homogeneidade do solo e apresentam, em média, entre dez e 20 hectares. Ainda conforme esta agência, além do sistema de plantio de “cana de ano” e “cana de ano e meio”, na região Centro-Sul, tem-se o plantio de inverno, na qual, a cana é plantada nos meses de maio a agosto juntamente com a torta de filtro que contém cerca de 70% a 80% de umidade.

Para melhor rendimento da colheita mecanizada, os talhões devem ter formatos retangulares e com no mínimo 600 metros de comprimento, a declividade não deve ser superior a 12%, com fileiras plantadas paralelamente e um espaçamento adequado do plantio (RIPOLI; RIPOLI, 2005). O terreno deve ser nivelado antes do plantio, melhorando o corte basal dos colmos e diminuindo o desnível entre o carregador e o talhão, evitando cortes manuais (ANSELM, 2008).

A colheita deve ser planejada para ocorrer no período de pico de maturação da cultura, que varia de acordo com o sistema de cultivo adotado, variedade, região de cultivo, além de outros fatores. O sistema de produção adotado pode ser de 12, 18 meses ou ambos, em proporções específicas, sendo que este é fator de grande influência no planejamento do corte, estando diretamente ligado ao planejamento do plantio (EMPRAPA, 2020).

Conforme Caversan (2017), a produtividade de sacarose diminui se a variedade de cana-de-açúcar ou cana-energia for colhida antes ou depois do seu pico de maturação (por volta de 12 meses após o plantio para a “cana de ano” e 18 meses para a “cana de ano e meio”). Ainda conforme este autor, para as variedades de cana-energia, diferente do que ocorre com a produtividade de sacarose, a produtividade de fibra aumenta ao longo dos próximos cortes, com o crescimento da variedade de cana-energia. Assim, a cana-energia pode até ser colhida depois de um período do pico de maturação, porém, não podendo ser muito extenso devido a cana-energia, assim como a cana-de-açúcar, floresce, frutifica e morre, garantindo a perpetuação da espécie.

Em média, o canavial é colhido quatro vezes a partir da rebrota. O primeiro corte é chamado de colheita da cana planta e, em seguida, a partir do segundo corte, corresponde a colheita da cana soca. Na Tabela (2.3) a seguir é apresentado um ciclo típico da média de produtividade em cinco cortes.

Tabela 2.3 - Ciclo padrão do corte da cana

Corte	Produtividade da cana por corte (t/ha)
1 ^o cana planta (18 meses)	113
1 ^o cana planta (12 meses)	77
2 ^o (1 ^a cana soca)	90
3 ^o (2 ^a cana soca)	78
4 ^o (3 ^a cana soca)	71
5 ^o (4 ^a cana soca)	67
Média dos cinco cortes	82,4

Fonte: Macedo et al (2004)

As canas tipo cana-energia, são plantas mais rústicas, por ter maior concentração de fibra e, portanto, mais resistentes às condições adversas se comparadas com a cana-de-açúcar, possuindo 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 (BAKKER, 1999). Segundo Giamalva *et al.* (1984) e Alexander (1985), 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.

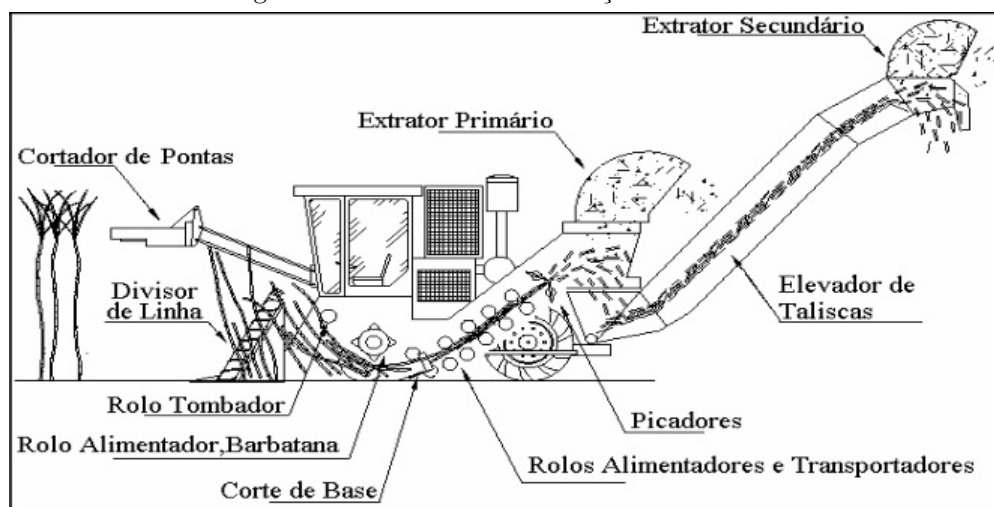
Existem três tipos de sistemas de colheita da cana. O sistema manual, que é o emprego da mão-de-obra para o corte e carregamento da matéria-prima. O sistema semi-mecanizado, em que o corte é manual e o carregamento mecanizado e o corte mecanizado, no qual, a colheita e o carregamento são mecanizados (RIPOLI *et al.*, 2007).

O sistema de colheita semi-mecanizado, empregado por muito tempo no Brasil, onde o trabalhador braçal realiza o corte com ferramenta apropriada e a cana é carregada inteira nos caminhões, com o uso de guinchos mecânicos, esta sendo substituído gradativamente pelo sistema de colheita mecanizado. O percentual que era 24,4%, na safra 07/08, atingiu 91,8% na safra 19/20. Devido ao relevo que favorece a mecanização, a região Centro/Sul já chega a 97,7% da colheita com o uso de máquinas. Diferentemente dessa, a Região Norte/Nordeste ainda não ultrapassou os 25% de área total com colheita mecanizada, uma vez que as áreas de produção são acidentadas e com declives acentuados (CONAB, 2020).

Atualmente, com a proibição total da queima da cana, há necessidade maior da colheita ser feita de forma totalmente mecanizada. No sistema mecanizado a máquina colhe a cana crua, separando a parte aérea do colmo, e vai depositando no caminhão, que transporta para a usina (PEREIRA; TORREZAM, 2006). A figura (2.2) mostra a forma de extração de resíduos de

colheita de uma colhedora de cana.

Figura 2.2: Mecanismo de extração da colhedora



Fonte: Novacana (2016)

A colheita da cana mecanizada não só aumenta o rendimento operacional do procedimento como também reduz seu impacto ambiental, por dispensar a queima de pontas e palhas, que pode ser usado para fins energéticos (Ripoli; Ripoli, 2009). Porém, na colheita mecânica de cana sem queima prévia, as perdas e matéria estranha aumentam em decorrência da grande quantidade de massa vegetal que é processada pela colhedora. Estas perdas podem ser de dois tipos: visíveis e invisíveis. As visíveis são aquelas que podem ser detectada visualmente no campo após a colheita, podendo ser colmos inteiros e/ou suas frações, rebolos e tocos resultantes no corte basal e as perdas invisíveis são na forma de caldo, serragem e estilhaços de cana que ocorrem em razão da ação dos mecanismos rotativos que cortam, picam e limpam a cana durante o processamento interno nas colhedoras (RODRIGUES, 2008)

Conforme Braunbeck e Oliveira (2006), levando-se em consideração a legislação vigente para o fim da queima da cana e o aproveitamento da palha para aplicações, tais como, geração de energia e cobertura vegetal para agricultura convencional ou orgânica, o processo de colheita da cana vem sofrendo mudanças visando o seu aproveitamento integral. A mecanização total ou parcial representa uma opção para a colheita que atende, simultaneamente, aos requisitos ambientais e de viabilidade econômica do setor.

2.4 Variedades de cana

A escolha da variedade de cana é um dos itens de menor custo ao produtor para garantir a melhor produtividade. Como boas características das variedades, estas devem apresentar alta

produtividade, alto teor de sacarose, rebrota, ausência de tombamento, teor de fibra dentro das recomendações e resistência a pragas e doenças (SILVEIRA *et al.*, 2002).

Para a escolha da variedade para o plantio, é necessário observar suas características que as tornam adequadas ao ambiente para não haver perdas do potencial produtivo e qualitativo. A escolha deve levar em consideração as variedades climatizada às condições locais, devendo uma mesma variedade ser plantada em, no máximo, 30% da área reservada para o plantio, para não haver contaminação de doença e pragas por toda a lavoura (CERVI, 2013).

Em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, a cana-de-açúcar deve apresentar teor de sacarose por volta de 12,5%. Já o teor de fibra, importante para colheita mecanizada, devido ao porte ereto e no menor tombamento das plantas e à industrialização, impactando a moagem e produção de energia da fábrica, devem oscilar de 8 a 14% (LAVANHOLI, 2008).

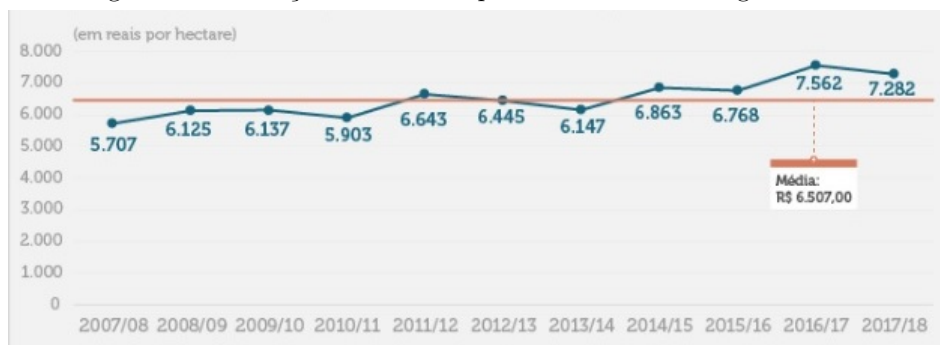
Para que a variedade de cana se adapte ao ambiente de plantio, são necessários que o clima, temperatura, umidade, luz, solo e disposição de nutrientes sejam favoráveis a variedade escolhida. Sendo assim importante o estudo da área a qual se pretende cultivar a cana, escolhendo dessa forma uma variedade que se adapte aquele ambiente. Outro dos fatores que deve ser analisado antes do plantio é a característica genética da cana pois, o melhoramento genético possibilita desenvolver variedades mais produtivas e com maior resistência aos ataques de pragas e doenças (GROFF, 2010).

As variedades a serem escolhidas devem apresentar alto índice de produtividade, elevado teor de açúcar, boa capacidade de rebrota, ausência de florescimento, fácil despalha, resistência a pragas e doenças, bom perfilhamento, difícil tombamento, com teor de fibra dentro das recomendações. Também devem ser escolhidas de acordo com as exigências do clima e solo onde serão cultivadas, e como período de maturação (tardia: setembro e novembro; média: julho a novembro ou precoce: maio e junho). A boa qualidade das mudas é o fator de produção de mais baixo custo e que maior retorno econômico proporciona ao agricultor, principalmente quando produzida por ele próprio (ESPINOZA, 2012)

2.5 Custos operacionais da cana

Segundo Novacana (2019), na safra de 2017/2018 o produtor gastou em média R\$7282,00 por hectare de plantio do canavial. O estudo foi feito em 33 amostras da região Centro-Sul não considerando a cana de fornecedores. A Figura (2.3) a seguir mostra a evolução do custo do plantio da cana-de-açúcar ao longo das safras.

Figura 2.3: Evolução do custo de plantio da cana ao longo das safras



Fonte: Novacana (2019).

De acordo com a Novacana (2020), o valor do plantio de um hectare do canavial pode variar de R\$ 5.939,31 e R\$ 9.054,49 de acordo com os insumos usados e as práticas de plantio adotadas pelo produtor.

Em São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, há uma disparidade de custo total de corte, transporte e transbordo (CTT) para uma distância de 25km. Na região de Olímpia, o CTT, por tonelada, foi de R\$26,77, enquanto que na região de Andradina esse mesmo CTT apresentou um valor de R\$37,25. A mesma disparidade foi observada nos valores isolados de CTT. É possível que esta disparidade esteja associada à quantidade de estradas em boas condições de rodagem, pelas quais o caminhão percorre (BIGATON *et al.*, 2017).

O custo médio, por tonelada, apurado na safra 2016/2017 por Bigaton *et al.* (2017) para a operação de transbordo foi de R\$6,54 e de R\$15,74 para o corte. No entanto, especificamente a operação de transporte, possui uma relação direta e positiva com a distância percorrida da propriedade até a usina. Assim como citado, para fins de balizamento, foi considerada uma distância média de 25km, a qual gerou um custo de transporte, por tonelada, na faixa de R\$7,75, totalizando o custo total de CTT de R\$30,03. A Tabela (2.4) mostra a estatística descritiva dos dados de corte, transbordo e transporte para a safra 2016/2017 no estado de São Paulo.

Tabela 2.4 - Valores de colheita, transporte e transbordo da cana na safra 2016/2017 no estado de São Paulo

	Unidade	Corte	Transbordo	Transporte	CTT
Média	R\$/t	15,74	6,54	7,75	30,03
Desvio Padrão		2,21	1,29	1,31	3,43
CV	%	14,04	19,74	16,99	11,73

Fonte: Bigaton *et al.* (2017)

2.6 Cogeração de energia através da fibra de cana

A cogeração de energia é uma prática cada vez mais usada pelas usinas sucroenergéticas. No Brasil, desde a instituição do Programa Brasileiro do Álcool (Proálcool), boa parte das usinas sucroenergéticas tornou-se auto-suficiente em termos energéticos. Elas passaram a gerar toda a energia necessária para suprir sua demanda utilizando cada vez mais o bagaço da cana, que responde por 30% do conteúdo energético da cana após a moagem, chegando a render excedentes que podem ser vendidos à rede de energia (BRIGHENTI, 2003).

Segundo a UNICA (2020), a bioeletricidade ofertada para a rede pelo setor sucroenergético foi 21,5TWh em 2018, correspondendo 5% do consumo nacional de energia elétrica. Mesmo assim, o potencial técnico da bioeletricidade sucroenergética para a rede é aproveitado em somente 15% de seu total. Essa geração é suficiente para abastecer 12 milhões de residências ao longo do ano, evitar a emissão de 7,4 milhões de toneladas de CO_2 , volume que somente consegue-se com o cultivo de 45 milhões de árvores nativas ao longo de 20 anos, poupar 15% da energia armazenada total nos reservatórios das hidrelétricas, por conta da maior previsibilidade e disponibilidade da bioeletricidade no período seco.

Cada tonelada de cana-de-açúcar processada na fabricação de açúcar e etanol gera, em média, 250kg de bagaço e 280kg de palha e pontas (ambos com umidade de 50%). Em 2019, 82% da bioeletricidade que foi fornecida ao Sistema Interligado Nacional (SIN) vieram do setor sucroenergético (UNICA, 2020).

Em estudo sobre o potencial energético da cana-de-açúcar, Ripolli *et al.* (2004) contabiliza o número de pessoas que poderiam ser atendidas por ano pela energia elétrica produzida pelo setor sucroenergético na região Centro-Sul do Brasil. Ao todo seriam 9,85 milhões, a partir do palhiço da cana-de-açúcar como fonte primária (se este não for queimado na lavoura) e 5,55 milhões a partir do bagaço, o que representa uma significativa quantidade de energia elétrica passível de comercialização.

Levando em consideração a produção de bioeletricidade para a rede somada com a destinada ao autoconsumo, a bioeletricidade representa a 3^a fonte mais importante na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), quase empatando com o gás natural. Em 2018, a OIEE foi de 632,1 mil GWh. A geração hídrica permaneceu na liderança com 67% da OIEE, seguida pelo gás natural com 8,5%. A biomassa gerou 52,5mil GWh, incluindo a parcela destinada ao autoconsumo, representando 8,3% de toda a oferta interna. Embora a fonte eólica continue aumentando sua participação, ainda ficou na 4^a posição, representando 7,7% da OIEE em 2018 (UNICA, 2018)

O Brasil, com extensa área agricultável e um clima favorável, não pode descartar a energia

da biomassa como parte integrante de suas matrizes energéticas. A cultura canavieira é a mais propícia para ampliar a participação da biomassa na matriz energética brasileira pois, além da extensão da área plantada, essa cultura oferece boas condições para transformar em energia elétrica o bagaço e o palhico proveniente da colheita sem a queima prévia (RIPOLI *et al.*, 1999).

Considerando as informações desse capítulo e devido ao interesse de se investigar a produção combinada das culturas de cana-de-açúcar e da cana-energia, no próximo capítulo são propostos três modelos multiobjetivos, visando selecionar variedades de cana-de-açúcar e cana-energia com a intenção de maximizar a produtividade de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia e, simultaneamente, minimizar o custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte. O primeiro e segundo modelos multiobjetivos consideram apenas a primeira colheita e o terceiro modelo multiobjetivo considera uma ou mais colheitas da cana-de-açúcar e cana-energia.

Modelos propostos para a escolha das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia

Neste capítulo, baseado em Caversan (2017), Souza (2017), Ramos *et al.* (2016). Nervis *et al.* (2017), Florentino *et al.* (2018), Junqueira e Morabito (2019), Florentino *et al.* (2020) e Poltroniere *et al.* (2021) são apresentados os três modelos multiobjetivos propostos.

3.1 Primeiro modelo multiobjetivo

O primeiro modelo multiobjetivo proposto seleciona variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, visando maximizar a produção de sacarose proveniente da cana-de-açúcar e fibra obtida por meio da cana-energia e minimizar, simultaneamente, o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, considerando um desvio do pico de maturação, se necessário, para suprir as demandas impostas pela usina. Estes objetivos são conflitantes, já que maximizando a produção de sacarose e fibra, ocorre mais gastos com cultivo e transporte, e minimizando o custo, diminui a produção de sacarose e fibra.

Assim, de acordo com a produtividade de sacarose da variedade de cana-de-açúcar e fibra da cana-energia ou de acordo com o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, a modelagem considera as tomadas de decisões: selecionar para cada talhão (predefinido para o plantio da cana-de-açúcar ou cana-energia) a variedade de cana-de-açúcar ou cana-energia que deve ser plantada; o mês de plantio em cada talhão; o mês da primeira colheita em cada talhão, de acordo com o pico de maturação e desvio para atender as demandas da usina. Desta forma, por meio da seleção das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, o modelo determina ponto eficiente com menor produção de sacarose e fibra e custo de produção mínimo até ponto eficiente com máxima produção de sacarose e fibra com custo de produção máximo, obtendo, para cada ponto eficiente, uma agenda de plantio e colheita.

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

Índices

i : associado a cana-de-açúcar e cana-energia;

j : associado aos talhões;

h : associado ao mês de plantio;

m : associado ao mês 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;

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

n_E : número de variedades de cana-energia;

L_j : área do talhão j em ha;

PCA_i^1 : produtividade da cana-de-açúcar no primeiro corte ($t.ha^{-1}$);

SA_i : porcentagem de sacarose contida na variedade de cana-de-açúcar i ;

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

PCE_i^1 : produtividade da cana-energia no primeiro corte ($t.ha^{-1}$);

FE_i : porcentagem de fibra contida na variedade de cana-energia i ;

PFE_{id}^1 : produtividade de fibra (tha^{-1}) da variedade i de cana-energia no seu primeiro corte, quando considerado o desvio do seu pico de maturação;

CA_j^1 : custo de plantio, cultivo, colheita e transporte de uma tonelada da variedade de cana-de-açúcar plantada no talhão j considerando o primeiro corte (em R\$);

CE_j^1 : custo de plantio, cultivo, colheita e transporte de uma tonelada da variedade de cana-energia plantada no talhão j considerando o primeiro corte (em R\$).

Conjuntos

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

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

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

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

H : conjunto de meses para o plantio da cana;

M : conjunto de meses para a colheita da cana;

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

DE : conjunto dos possíveis desvios em relação ao pico de maturação da cana-energia;

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

DF_m : demanda de fibra, em toneladas, no mês m ;

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

Variáveis de decisão

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

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

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a variedade } i \text{ for plantada no talhão } j \text{ nos meses de setembro a outubro} \\ 0, & \text{se a variedade } i \text{ for plantada no talhão } j \text{ nos meses de janeiro a março.} \end{cases}$$

O primeiro modelo multiobjetivo está representado pelas expressões de (3.1) a (3.11) a seguir:

$$\text{Maximizar}(P_{SF}^1, -C_{CCT}^1) \tag{3.1}$$

Sujeito a

$$\sum_{i \in (V_A \cup V_E)} \sum_{h \in H} x_{ijh} = 1, \quad \forall j \in J_A \cup J_E. \tag{3.2}$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq 0.3k_A, \quad \forall i \in V_A. \tag{3.3}$$

$$\sum_{j \in J_E} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq 0.3k_E, \quad \forall i \in V_E. \tag{3.4}$$

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{h \in H} hx_{ijh} - 4 \leq 6y_j \leq \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{h \in H} hx_{ijh}, \quad \forall j \in J_A \cup J_E. \tag{3.5}$$

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{h \in H} ix_{ijh} = \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} it_{ijmd} + \sum_{d \in D_E} it_{ijmd} \right), \quad \forall j \in J_A \cup J_E. \tag{3.6}$$

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} it_{ijmd} + \sum_{d \in D_E} it_{ijmd} \right) = 1, \quad \forall j \in J_A \cup J_E. \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} mt_{ijmd} + \sum_{d \in D_E} mt_{ijmd} \right) &= \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \left(\sum_{d \in D_A} (18 + d)t_{ijmd} + \right. \\ &+ \left. \sum_{d \in D_E} (18 + d)t_{ijmd} \right) - 6y_j, \quad \forall j \in J_A \cup J_E. \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D_A} PSA_{id}^1 L_j t_{ijmd} \geq DS_m, \quad \forall m \in M. \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D_E} PFE_{id}^1 L_j t_{ijmd} \geq DF_m, \quad \forall m \in M. \quad (3.10)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D_A} PCA_i^1 L_j t_{ijmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D_E} PCE_i^1 L_j t_{ijmd} \leq CM_m, \quad \forall m \in M. \quad (3.11)$$

$$x_{ijh} \in \{0, 1\}, \quad y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V_A \cup V_E, \quad \forall j \in J_A \cup J_E, \quad \forall h \in H. \quad (3.12)$$

$$t_{ijmd} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V_A \cup V_E, \quad \forall j \in J_A \cup J_E, \quad \forall m \in M, \quad \forall d \in D_A \cup D_E. \quad (3.13)$$

O cálculo da produção de sacarose proveniente da cana-de-açúcar e fibra obtida a partir da cana-energia no primeiro corte (P_{SF}^1) (em toneladas) é obtida pelo somatório da produtividade de sacarose e fibra das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia selecionadas, conforme a expressão (3.14)

$$P_{SF}^1 = \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_A} PSA_{id}^1 L_j t_{ijmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_E} PFE_{id}^1 L_j t_{ijmd}. \quad (3.14)$$

O custo de plantio, cultivo, colheita e transporte no primeiro corte (C_{CCT}^1) (em reais) das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia selecionadas é obtido pela expressão (3.15)

$$C_{CCT}^1 = \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_A} CA_j^1 PCA_{1i} L_j t_{ijmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_E} CE_j^1 PCE_{1i} L_j t_{ijmd}. \quad (3.15)$$

A produção de sacarose das variedades de cana-de-açúcar, considerando o desvio do pico de maturação (12 meses após o plantio para a cana de ano e 18 meses para a cana de ano e meio) para o primeiro corte (PSA_{id}^1) é calculada pela expressão (3.16) e proposta por Nervis *et al.* (2017).

$$PSA_{id}^1 = (-0,0243d^2 + 1)SA_i PCA_i^1, \quad \forall i \in V_A, \quad \forall d \in D_A. \quad (3.16)$$

A produção de fibra das variedades de cana-energia, considerando o desvio do pico de maturação (12 meses após o plantio para a cana de ano e 18 meses para a cana de ano e meio) para o primeiro corte (PFE_{id}^1) é calculada pela expressão (3.17) e proposta por Caversan (2017).

$$PFE_{id}^1 = (0,0041d + 1)FE_i PCE_i^1, \quad \forall i \in V_E, \quad \forall d \in D_E. \quad (3.17)$$

Em (3.1) a expressão (3.14) é maximizada e a expressão (3.15) minimizada simultaneamente. As restrições (3.2) garantem que, em cada talhão j , seja plantada uma única variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia, no mês h . As restrições (3.3) e (3.4) garantem que cada variedade i escolhida de cana-de-açúcar e cana-energia, respectivamente, seja plantada em, no máximo, 30% dos talhões reservados para estas. As restrições (3.5) verificam se a variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia selecionada para o plantio no talhão j é de “ano” ou “ano e meio”. As restrições (3.6) asseguram que a variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia colhida no talhão j no mês de colheita m com desvio d seja a mesma plantada no mês h . O conjunto de restrições (3.7) garantem que a variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia plantada no talhão j tenha uma única colheita anual. As restrições (3.8) determinam o mês de colheita da variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia plantada no talhão j . As restrições (3.9) e (3.10) asseguram o atendimento da demanda mensal de sacarose e da fibra em toneladas, respectivamente. As restrições (3.11) estipulam um limite superior mensal para a moagem da cana-de-açúcar e da cana-energia em toneladas. As restrições (3.12) e (3.13) definem o domínio das variáveis de decisão.

3.2 Segundo modelo multiobjetivo

O modelo multiobjetivo proposto nesta seção escolhe as variedades de cana-de-açúcar e cana-energia que devem ser plantadas, visando maximizar a produção de sacarose e fibra obtida a partir da cana-de-açúcar e fibra proveniente da cana-energia, minimizando, simultaneamente, o custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte destas variedades. Diferenciando do primeiro modelo multiobjetivo por considerar também a fibra da cana-de-açúcar.

O modelo multiobjetivo leva em consideração: determinar para cada talhão a variedade de cana-de-açúcar ou cana-energia que deve ser plantada; o mês do plantio em cada talhão; o mês da primeira colheita em cada talhão, de acordo com o pico de maturação e desvio para atender as demandas da usina. Assim, por meio de escolha de variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, o modelo determina ponto eficiente de menor produção de sacarose e fibra com custo mínimo até ponto eficiente de máxima produção de sacarose e fibra com maior custo de produção das variedades, obtendo, para cada ponto eficiente, uma agenda de plantio e colheita.

Os índices, parâmetros, conjuntos e variáveis de decisão utilizados na modelagem definida na Seção (3.1) foram também usados para este modelo. Além destes, seguem os parâmetros adicionais:

Parâmetros

FA_i : Porcentagem de fibra contida na variedade de cana-de-açúcar i ;

PFA_{id}^1 : produção de fibra (tha^{-1}) da variedade i de cana-de-açúcar no seu primeiro corte;

São apresentados a seguir, as funções objetivo e as restrições do segundo modelo proposto.

$$\text{Maximizar}(P_{SFA}^1, -C_{CCT}^1) \quad (3.18)$$

Sujeito às mesmas restrições do modelo apresentado na Seção (3.1), porém, com acréscimo de fibra da cana-de-açúcar na restrição (3.10), conforme a expressão (3.19) a seguir:

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D_A} PFA_{id}^1 L_j t_{ijmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D_E} PFE_{id}^1 L_j t_{ijmd} \geq DF_m, \quad \forall m \in M. \quad (3.19)$$

O cálculo da produção de sacarose obtida a partir da cana-de-açúcar e fibra proveniente da cana-de-açúcar e cana-energia no primeiro corte (P_{SFA}^1) (em toneladas) é obtido pelo somatório da produtividade de sacarose e fibra das variedades de cana-de-açúcar selecionadas e fibra das variedades de cana-energia escolhidas, conforme a expressão (3.20):

$$\begin{aligned}
P_{SFA}^1 = & \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_A} (PSA_{id}^1 + PFA_{id}^1) L_j t_{ijmd} + \\
& + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D_E} PFE_{id}^1 L_j t_{ijmd}.
\end{aligned} \tag{3.20}$$

A produção de fibra das variedades de cana-de-açúcar no primeiro corte e considerando o desvio do pico de maturação (PFA_{id}^1), definida pela expressão (3.21), é uma extensão da expressão (3.16), para a produção de fibra.

$$PFA_{id}^1 = (-0,0243d^2 + 1)FA_i PCA_i^1, \quad \forall i \in V_A, \quad \forall d \in D_A. \tag{3.21}$$

Para o cálculo do custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte da cana colhida (C_{CCT}^1), utiliza-se a expressão (3.15) já apresentada na Seção (3.1).

Em (3.18) a expressão (3.20) é maximizada e a expressão (3.15) minimizada simultaneamente. As restrições (3.19) asseguram o atendimento da demanda mensal de fibra, em toneladas, obtida a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

3.3 Terceiro modelo multiobjetivo

O modelo multiobjetivo proposto nesta seção seleciona as variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, de forma a maximizar a produção de sacarose e fibra proveniente das duas espécies de cana, minimizando, simultaneamente, o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte relativo a mais de um período de colheita.

No modelo multiobjetivo são considerada as decisões: determinar para cada talhão a variedade de cana-de-açúcar ou cana-energia que deve ser plantada; o mês do plantio nos talhões; o mês de colheita para cada período de colheita nos talhões, de acordo com o pico de maturação e desvio para atender as demandas da usina. Assim, para cada período de colheita, por meio de escolha de variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, o modelo determina ponto eficiente de menor produção de sacarose e fibra com custo operacional mínimo até ponto eficiente de máxima produção de sacarose e fibra com maior custo operacional, obtendo, para cada ponto eficiente, uma agenda de plantio e colheita.

Os índices, parâmetros, conjuntos e variáveis de decisão utilizados na modelagem definidas nas Seções (3.1) e (3.2) foram também usados neste modelo. Além destes, segue os índices, parâmetros, conjuntos e variáveis adicionais para este modelo:

Índices

α_A : associado a taxa de decréscimo da produção da cana-de-açúcar para cada corte;

α_E : associado a taxa de acréscimo da produção da cana-energia para cada corte;

c : associado ao período de colheita.

Parâmetros

PSA_{id}^c : produtividade de sacarose da variedade i de cana-de-açúcar em cada colheita c , considerando o desvio do mês ideal de colheita d em (tha^{-1}) ;

PFE_{id}^c : produtividade de fibra da variedade i de cana-energia em cada colheita c , considerando o desvio do mês ideal de colheita d em (tha^{-1}) ;

PFA_{id}^c : produtividade de fibra da variedade i de cana-de-açúcar em cada colheita c , considerando o desvio do mês ideal de colheita d em (tha^{-1}) ;

PSE_{id}^c : produtividade de sacarose da variedade i de cana-energia em cada colheita c , considerando o desvio do mês ideal de colheita d em (tha^{-1}) ;

SE_i : porcentagem de sacarose contida na variedade de cana-energia i ;

CA_j^c : custo operacional de cultivo, colheita e transporte da variedade de cana-de-açúcar plantada no talhão j em cada colheita c (na primeira colheita é considerado também o custo do plantio da variedade de cana-de-açúcar) (tha^{-1}) ;

CE_j^c : custo operacional de cultivo, colheita e transporte da variedade de cana-energia plantada no talhão j em cada colheita c (na primeira colheita é considerado também o custo do plantio da variedade de cana-energia) (tha^{-1}) ;

Conjuntos

C : Conjunto dos períodos de colheita c ;

D : Conjunto dos desvios d para a cana-de-açúcar e cana-energia;

DS_{cm} : Demanda de sacarose, em toneladas, na colheita c , no mês de colheita m ;

DF_{cm} : Demanda de fibra, em toneladas, na colheita c , no mês de colheita m ;

CM_{cm} : Capacidade de moagem, em toneladas, na colheita c , no mês de colheita m ;

Variável de decisão

$$t_{ijcmd} = \begin{cases} 1, & \text{se a variedade } i \text{ plantada no talhão } j \text{ for colhida no mês } m, \text{ no período} \\ & \text{de colheita } c \text{ com desvio } d. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A seguir, são apresentadas a função multiobjetivo e as restrições do modelo proposto.

$$\text{Maximizar}(P_{SF}^c, -C_{CT}^c) \quad (3.22)$$

Sujeito às restrições de (3.2) a (3.5) e (3.12) do modelo multiobjetivo da Seção (3.1) com acréscimo das restrições apresentadas a seguir:

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{h \in H} ix_{ijh} = \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} it_{ijcmd}, \quad \forall c \in C, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (3.23)$$

$$\sum_{i \in (V_A \cup V_E)} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} it_{ijcmd} = 1, \quad \forall c \in C, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (3.24)$$

$$\sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} mt_{ij1md} = \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} (18 + d)t_{ij1md} - 6y_j, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} mt_{ijcmd} &= \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} mt_{ij(c-1)md} + \\ &+ \sum_{i \in V_A \cup V_E} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} (12 + d)t_{ijcmd} \quad \forall c > 1 \in C, \quad \forall j \in J_A \cup J_E \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D} PSA_{id}^c L_j t_{ijcmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D} PSE_{id}^c L_j t_{ijcmd} \geq DS_m^c, \quad \forall c \in C \quad (3.27)$$

$$\sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D} PFA_{id}^c L_j t_{ijcmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D} PFE_{id}^c L_j t_{ijcmd} \geq DF_m^c, \quad \forall c \in C \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{d \in D} (1 - \alpha_A)^{(c-1)} PCA_i^1 L_j t_{ijcmd} + \\ + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{d \in D} (1 + \alpha_E)^{(c-1)} PCE_i^1 L_j t_{ijmd} \leq CM_m^c \quad \forall c \in C, \quad \forall m \in M \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$t_{ijcmd} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V_A \cup V_E, \quad \forall j \in J_A \cup J_E, \quad \forall c \in C, \quad \forall m \in M, \quad \forall d \in D. \quad (3.30)$$

O cálculo da produção de sacarose e fibra em c cortes (P_{SF}^c) (em toneladas) é obtida pelo somatório da produção de sacarose e fibra das variedades de cana-de-açúcar e das variedades de cana-energia selecionadas para o plantio e colhidas em c períodos, conforme a expressão (3.31).

$$P_{SF}^c = \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} (PSA_{id}^c + PFA_{id}^c) L_j t_{ijcmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} (PFE_{id}^c + PSE_{id}^c) L_j t_{ijcmd} \quad (3.31)$$

Observa-se em (3.31) que para a definição de P_{SF}^c , são considerados dois termos a saber: o primeiro termo determina a produção de sacarose e da fibra (em toneladas) considerando as variedades de cana-de-açúcar selecionadas para o plantio em um ou mais períodos de colheita e o segundo termo determina a produção de sacarose e fibra (em toneladas) considerando as variedades de cana-energia selecionadas para o plantio em um ou mais períodos de colheita.

O cálculo do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte para c períodos de colheita (C_{CCT}^c) (em reais) é a soma do custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte das variedades selecionadas de cana-de-açúcar com o custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte das variedades selecionadas de cana-energia, de acordo com a expressão (3.32).

$$C_{CCT}^c = \sum_{j \in J_A} \sum_{i \in V_A} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} CA_j^c L_j t_{ijcmd} + \sum_{j \in J_E} \sum_{i \in V_E} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} CE_j^c L_j t_{ijcmd} \quad (3.32)$$

Para determinar a produtividade de sacarose da variedade de cana-de-açúcar em cada corte considerando o desvio do mês ideal de colheita, utiliza-se a expressão (3.33), baseando-se na expressão (3.16) para o primeiro corte e estendida para c cortes.

$$PSA_{id}^c = (-0,0243d^2 + 1)(1 - \alpha_A)^{(c-1)} SA_i PCA_i^1, \quad \forall c \in C, \quad \forall i \in V_A, \quad \forall d \in D \quad (3.33)$$

Para a variedade de cana-de-açúcar, pode-se fazer uma aproximação da produtividade de fibra, usando a expressão (3.33), porém, substituindo a porcentagem da sacarose da cana-de-açúcar (SA_i) pela porcentagem de fibra (FA_i), conforme a expressão (3.34) para c cortes apresentada a seguir.

$$PFA_{id}^c = (-0,0243d^2 + 1)(1 - \alpha_A)^{(c-1)}FA_iPCA_i^1, \quad \forall c \in C, \quad \forall i \in V_A, \quad \forall d \in D \quad (3.34)$$

Para calcular a produtividade de fibra da variedade da cana-energia em cada corte, considerando o desvio do mês ideal de colheita, utiliza-se a expressão (3.35) a seguir, estendida para c cortes a partir da expressão (3.17):

$$PFE_{id}^c = (0,0041d + 1)(1 + \alpha_E)^{(c-1)}FE_iPCE_i^1, \quad \forall c \in C, \quad \forall i \in V_E, \quad \forall d \in D \quad (3.35)$$

Para calcular a produtividade de sacarose da variedade da cana-energia em cada corte, considerando o desvio do mês ideal de colheita, utiliza-se a expressão (3.36), determinada através da expressão (3.35) com substituição da porcentagem de fibra da cana-energia (FE_i) pela porcentagem de sacarose (SE_i).

$$PSE_{id}^c = (0,0041d + 1)(1 + \alpha_E)^{(c-1)}SE_iPCE_i^1, \quad \forall c \in C, \quad \forall i \in V_E, \quad \forall d \in D \quad (3.36)$$

Em (3.22) a expressão (3.31) é maximizada e a expressão (3.32) minimizada simultaneamente. As restrições (3.23) asseguram que a variedade i , colhida no talhão j , no mês de colheita m , com desvio d , em cada período c de colheita, seja a mesma selecionada para o plantio no mês h . As restrições (3.24) garantem que haverá um único corte nos talhões em cada período c de colheita. As restrições (3.25) determinam o mês de colheita da variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia plantada no talhão j na primeira colheita. As restrições (3.26) determinam o mês de colheita da variedade i de cana-de-açúcar ou cana-energia plantada no talhão j a partir da segunda colheita. As restrições (3.27) garantem o atendimento da demanda mensal de sacarose em cada período c de colheita, obtida a partir da cana-de-açúcar e cana-energia. As restrições (3.28) asseguram o atendimento da demanda mensal de fibra proveniente da cana-de-açúcar e da cana-energia para cada período c de colheita. As restrições (3.29) estipulam um limite superior mensal para a moagem da cana-de-açúcar e da cana-energia em toneladas em cada período c de colheita. As restrições (3.30) definem o domínio das variáveis de decisão.

No próximo capítulo são apresentados os conceitos e as definições da Otimização Multiobjetivo (OM) e uma metodologia para solucionar os modelos multiobjetivos propostos neste capítulo,

dando ênfase ao Método das Restrições Canalizadas Progressivas (MRCP), que é um método que transforma um modelo multiobjetivo em um conjunto de modelos mono-objetivos, os quais foram resolvidos por métodos exatos.

Metodologia de solução para os modelos multiobjetivos propostos

Neste capítulo são apresentados algumas definições e conceitos de otimização multiobjetivo, que são importantes para a resolução e aplicação do MCRP nos modelos multiobjetivos apresentados nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3 conforme mostrado no Capítulo 5. As definições e conceitos apresentados foram baseados em Jones e Tamiz (2010) e Ehrgott (2005). As definições formais e teóricas sobre a otimização multiobjetivo encontram-se no Apêndice A.

4.1 Definições e conceitos

Um problema de otimização multiobjetivo tem um número $r > 1$ de funções objetivos que devem ser minimizadas, sujeito a um conjunto viável $\emptyset \neq \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^n$. De forma geral, um problema de otimização multiobjetivo é apresentado na forma:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } z = (f_1(x), \dots, f_r(x)) \\ & \text{Sujeito a } x \in \mathcal{X} = \{x \in \mathbb{R}^n : g_j(x) \leq 0, j = 0, \dots, l\} \end{aligned} \quad (4.1)$$

em que:

- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$: vetor das variáveis de decisão;
- $z_k = f_k(x)$: k -ésima função objetivo a ser minimizada, $k = 1, \dots, r$;
- $\emptyset \neq \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^n$: espaço de decisão ou factível, gerada pelas l restrições $g_j(x) \leq 0$.

Em um problema de otimização multiobjetivo todas as funções objetivo são conflitantes entre si, ou seja, a minimização em uma ocasiona o aumento de pelo menos uma outra função.

Jones & Tamiz (2010) apresentam as seguintes definições para as soluções no espaço de decisões e respectivos valores das funções objetivo no espaço objetivo, definido a seguir, denominadas de Pareto-Ótimas.

- **Espaço critério:** O espaço $\mathcal{Z} \subseteq \mathbb{R}^r$ gerado pela aplicação das r funções objetivos no espaço $\mathcal{X}$ é chamado de espaço critério ou objetivo. Formalmente: $\mathcal{Z} = \{z_r \in \mathbb{R} : z_r = f_r(x), r = 1, \dots, l; \quad \forall x \in \mathcal{X}\}$
- **Dominância:** Uma solução x_1 domina outra solução x_2 , ambas pertencentes ao conjunto $\mathcal{X}$, se as condições a seguir são satisfeitas:
 1. A solução x_1 não é pior que a solução x_2 em todos os objetivos, isto é, $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, $k = 1, \dots, r$.
 2. A solução x_1 é estritamente melhor que a solução x_2 em pelo menos uma componente $\bar{k} \in \{1, \dots, r\}$, isto é, $f_{\bar{k}}(x_1) < f_{\bar{k}}(x_2)$.

Assim, a solução x_1 domina a solução x_2 , ou a solução x_2 é dominada pela solução x_1 . Em notação: $x_1 \preceq x_2$. O caso em que x_1 não domina x_2 , a notação fica: $x_1 \not\preceq x_2$.

- **Solução eficiente ou Pareto-Ótima:** Uma solução $x^* \in \mathcal{X}$ é chamada eficiente ou não dominada ou Pareto-Ótima, se não existe uma outra solução $x \in \mathcal{X}$, de maneira que $x \preceq x^*$.
 Conforme Jones e Tamiz (2010) uma solução de um problema multiobjetivo é eficiente se não existe nenhuma outra solução viável que é tão boa em relação a todos os objetivos e estritamente melhor em se tratando de pelo menos um objetivo.
- **Solução dominada ou não eficiente:** Uma solução $x \in \mathcal{X}$ é chamada de dominada ou não eficiente quando é dominada por pelo menos uma solução $x^* \in \mathcal{X}$. Em notação: $x^* \preceq x$. A imagem no espaço critério de uma solução não eficiente resulta num ponto dominado e no interior do conjunto $\mathcal{Z}$.
- **Conjunto eficiente:** Denotado por $\mathcal{X}^*$, são todos os elementos de $\mathcal{X}$ que não são dominados por nenhum membro de $\mathcal{X}$, ou seja, $\mathcal{X}^* = \{x^* \in \mathcal{X} : x \not\preceq x^*, \forall x \in \mathcal{X}\}$.
- **Espaço critério não dominado:** A imagem do conjunto eficiente $\mathcal{X}^*$ é o conjunto $\mathcal{Z}^* \subseteq \mathcal{Z}$ e chamado de espaço critério não dominado. Formalmente, $\mathcal{Z}^* = \{z^* \in \mathbb{R}^r : z^* = f(x^*), \forall x^* \in \mathcal{X}^*\}$. Para o caso de um problema multiobjetivo com $r = 2$ objetivos, os pontos pertencentes ao espaço critério não dominado são utilizados para esboçar a curva Pareto-Ótimo.

- **Ponto ideal:** Um ponto $z^l \in \mathcal{Z}$ em que cada objetivo de um problema de otimização multiobjetivo leva o seu valor ótimo quando otimizado individualmente, dentro da região viável, é chamado de ponto ideal.
- **Vetor nadir:** O vetor $z^N \in \mathcal{Z}$ é chamado de nadir e sua k -ésima componente é o maior valor da função objetivo k no espaço critério. Para um problema multiobjetivo com $r = 2$ é possível determinar o vetor nadir da seguinte forma: no conjunto das soluções eficientes, o valor mínimo de uma função objetivo é o valor máximo da outra e vice-versa. Estes pontos são chamados de *end-points* ou lexicográficos da curva Pareto-Ótimo.

Uma metodologia para solucionar problemas de otimização multiobjetivo deve determinar um conjunto eficiente que atenda à duas metas diferentes e conflitantes: produzir globalmente soluções eficientes e distribuir e diversificar os valores relativos a essas soluções ao longo da fronteira (no caso de um modelo multiobjetivo com $r = 2$, esses valores determinarão a curva Pareto-Ótimo). Assim, na próxima seção é apresentado o Método das Restrições Canalizadas Progressivas (MRCP) de forma a atender estas metas.

4.2 Método das restrições canalizadas progressivas

Nos modelos multiobjetivos propostos, a maximização de sacarose e fibra e a minimização dos custos de plantio, cultivo, colheita e transporte são objetivos conflitantes pois, para obter variedades de cana-de-açúcar e cana-energia com maior produção de sacarose e fibra, é necessário o aumento do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, enquanto que, reduzindo o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, obtém-se variedades de cana-de-açúcar e cana-energia com menor produção de sacarose e fibra. Assim, uma estratégia de resolução dos modelos é o Método das Restrições Canalizadas Progressivas (MRCP) proposto por Gonçalves *et al.* (2019), que mantém uma das funções objetivo e incorpora a outra nas restrições do problema por meio de uma canalização definida por limites inferior e superior pré-definidos.

Neste caso, qualquer uma das expressões (P_{SF}^c ou C_{CT}^c) poderá ser escolhida como a função objetivo a ser maximizada (ou minimizada) ou incorporada às restrições, com limitantes inferior e superior para a produção de sacarose e fibra ou para o custo operacional, conforme os N subproblemas mono-objetivos definidos em 4.3, 4.4 e 4.5, para cada subintervalo I_{ck} , $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e $c \geq 1$. Para os modelos das Seções 3.1 e 3.2 é considerado apenas a primeira colheita e para o modelo da Seção 3.3, considera-se uma ou mais colheitas.

No máximo, serão determinadas N soluções eficientes para cada colheita, em cada subintervalo I_{ck} , na qual $I_{ck} = [C_{CT_k(min)}^c, C_{CT_k(max)}^c]$ ou $I_{ck} = [P_{SF_k(min)}^c, P_{SF_k(max)}^c]$, tal que $I_{ck} \subset I_c$,

sendo I_c o intervalo definido para o custo operacional ou para a produção de sacarose e fibra a partir dos pontos lexicográficos em cada subproblema associado a colheita. Assim, os pontos lexicográficos dos modelos apresentados nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3 são obtidas através da resolução dos modelos de otimização mono-objetivos a seguir, sujeitos às restrições impostas para cada modelo destas seções:

- Coordenadas do ponto lexicográfico mínimo

$$C_{CCT(min)}^c = \text{Minimize}(C_{CCT}^c)$$

Sujeito às restrições dos modelos das Seções 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente.

$$P_{SF(min)}^c = \text{Produção de sacarose e fibra obtida por meio de } C_{CCT(min)}^c \quad (4.2)$$

- Coordenadas do ponto lexicográfico máximo

$$P_{SF(max)}^c = \text{Maximize } P_{SF}^c$$

Sujeito às restrições dos modelos das Seções 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente.

$$C_{CCT(max)}^c = \text{Custo de } P_{SF(max)}^c \quad (4.3)$$

O intervalo I_c , no qual, os extremos para canalização de (P_{SF}^c) ou (C_{CCT}^c) são obtidos através dos Problemas 4.2 e 4.3, são divididos em N_c subintervalos igualmente espaçados, em que $k = 0, 1, 2, \dots, N_c - 1$, de amplitudes $C\Delta_c > 0$ (canalizando C_{CCT}^c) ou $P\Delta_c > 0$ (canalizando P_{SF}^c), tal que, $C\Delta_c = \frac{C_{CCT(max)}^c - C_{CCT(min)}^c}{N_c}$ ou $P\Delta_c = \frac{P_{SF(max)}^c - P_{SF(min)}^c}{N_c}$, que é aplicado nas determinações dos limites inferior $(C_{CCT_k(min)}^c \text{ ou } P_{SF_k(min)}^c)$ e limites superior $(C_{CCT_k(max)}^c \text{ ou } P_{SF_k(max)}^c)$ da forma:

$$C_{CCT_k(min)}^c = C_{CCT(min)}^c + kC\Delta_c \quad \text{e} \quad C_{CCT_k(max)}^c = C_{CCT(min)}^c + (k+1)C\Delta_c \quad (4.4)$$

$$P_{SF_k(min)}^c = P_{SF(min)}^c + kP\Delta_c \quad \text{e} \quad P_{SF_k(max)}^c = P_{SF(min)}^c + (k+1)P\Delta_c \quad (4.5)$$

sendo $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$, $C_{CCT_0(min)}^c = C_{CCT}^c$, $C_{CCT_{N-1}(max)}^c = C_{CCT(max)}^c$,

$P_{SF_0(min)}^c = P_{SF(min)}^c$ e $P_{SF_{N-1}(max)}^c = P_{SF(max)}^c$.

Em cada subintervalo I_{ck} , os valores $C_{CCT_k(min)}^c$, $C_{CCT_k(max)}^c$, $P_{SF_k(min)}^c$ e $P_{SF_k(max)}^c$ representam, respectivamente, os limites inferior e superior para cada valor de k das expressões C_{CCT}^c e P_{SF}^c em cada período de colheita c (para os modelos multiobjetivos das Seções 3.1 e 3.2, considere $c = 1$), que foi canalizada e incorporada às restrições nos subproblemas mono-objetivos das Seções 4.3, 4.4 e 4.5.

Conforme Santos (2016), quanto maior for a quantidade de subintervalos do conjunto I_c associado a expressão que será canalizada e inserida no conjunto de restrições do modelo, melhor será a distribuição de pontos na curva Pareto-ótimo. Destaca-se que para problemas com variáveis inteiras 0-1, o número de soluções em cada subintervalo é limitado devido a complexidade de determinar essas soluções em um conjunto eficiente discreto e finito, como será visto na resolução dos modelos propostos.

Utilizando estas informações e as contidas nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3, os modelos multiobjetivos definidos nestas seções, podem ser representados pelos modelos mono-objetivos representados nas Seções 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

Assim, para cada um destes modelos é feita a escolha de usar a expressão (C_{CCT}^c) ou a expressão (P_{SF}^c) como função objetivo e, escolhendo-se uma delas como função objetivo, canaliza-se e insere-se a outra junto às restrições do modelo.

4.3 Primeiro modelo multiobjetivo representado na forma mono-objetivo

A seguir, o modelo multiobjetivo da Seção 3.1 é representado na forma mono-objetivo de duas formas, ou seja, canalizando a produção de sacarose e fibra e o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte. Assim, escolhendo a expressão (3.14) como função objetivo, canaliza-se a expressão (3.15) e vice-versa, conforme os modelos mono-objetivo (4.6) e (4.7) apresentandos abaixo:

- Problema de otimização considerando-se a expressão (3.14).

Maximizar (P_{SF}^1)

Sujeito a todas restrições do modelo da Seção 3.1 com acréscimo da canalização da expressão (3.15) conforme mostrado pelas inequações a seguir:

$$C_{CCTk(min)}^1 \leq C_{CCTk}^1 \leq C_{CCTk(max)}^1 \quad (4.6)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$.

- Problema de otimização considerando-se a expressão (3.15).

Minimizar (C_{CCT}^1)

Sujeito a todas restrições do modelo da Seção 3.1 com acréscimo da canalização da expressão (3.14) conforme mostrado pelas inequações a seguir:

$$P_{SFk(min)}^1 \leq P_{SFk}^1 \leq P_{SFk(max)}^1 \quad (4.7)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$.

4.4 Segundo modelo multiobjetivo representado na forma mono-objetivo

O modelo multiobjetivo da Seção (3.2) foi representado de forma mono-objetivo de duas formas, ou seja, canalizando a produção de sacarose e fibra (P_{SF}^1) e o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte (C_{CCT}^1). Assim, escolhendo a expressão (3.20) como função objetivo, canaliza-se a expressão (3.15) e vice-versa, conforme os modelos mono-objetivo (4.8) e (4.9) apresentando abaixo:

- Problema de otimização considerando-se a expressão (3.20).

Maximizar (P_{SFA}^1)

Sujeito a todas restrições do modelo multiobjetivo da Seção (3.2) com acréscimo da canalização da expressão (3.15) conforme mostrado pelas Inequações a seguir:

$$C_{CCTk(min)}^1 \leq C_{CCTk}^1 \leq C_{CCTk(max)}^1 \quad (4.8)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$.

- Problema de otimização considerando-se a expressão (3.15).

Minimizar (C_{CCT}^1)

Sujeito a todas restrições do modelo multiobjetivo da Seção (3.2) com acréscimo da canalização da expressão (3.20) conforme mostrado pelas inequações a seguir:

$$P_{SFAk(min)}^1 \leq P_{SFAk}^1 \leq P_{SFAk(max)}^1 \quad (4.9)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$.

4.5 Terceiro modelo multiobjetivo representado na forma mono-objetivo

Segue a representação do modelo multiobjetivo da Seção (3.3) na forma mono-objetivo em que, escolhendo-se a expressão (3.31) como função objetivo, canaliza-se a expressão (3.32) e vice-versa, conforme os modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11) apresentando a seguir:

- Problema de otimização considerando-se a expressão (3.31).

Maximizar (P_{SF}^c)

Sujeito a todas restrições do modelo multiobjetivo da Seção (3.3) com acréscimo da canalização da expressão (3.32) conforme as inequações a seguir:

$$C_{CCTk(min)}^c \leq C_{CCTk}^c \leq C_{CCTk(max)}^c \quad (4.10)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$.

- Problema de otimização considerando-se a expressão (3.32).

Minimizar (C_{CCT}^c)

Sujeito a todas restrições do modelo multiobjetivo da Seção (3.3) com acréscimo da canalização da expressão (3.31) conforme as inequações a seguir:

$$P_{SFk(min)}^c \leq P_{SFk}^c \leq P_{SFk(max)}^c \quad (4.11)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N_c - 1$.

Cada um dos modelos representados nas Seções (4.3), (4.4) e (4.5) representa uma sequência de k subproblemas mono-objetivos, em que $k = 0, \dots, N_c - 1$. Assim, quando deseja-se maximizar a produção de sacarose e fibra, consideram-se todas as restrições dos modelos apresentados nas Seções (3.1), (3.2) e (3.3) e a canalização do custo, de acordo com modelos mono-objetivos (4.6), (4.8) e (4.10), respectivamente. E quando deseja-se minimizar o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, consideram-se todas as restrições apresentadas nestas seções e a canalização da produção de sacarose e fibra, conforme os modelos mono-objetivos (4.7), (4.9) e (4.11), respectivamente.

4.6 Refinamento do MRCP

Para algum subintervalo k (I_{ck}) definido pelo limite inferior ($C_{CCTk(min)}^c$ ou $P_{SFk(min)}^c$) e limite superior ($C_{CCTk(max)}^c$ ou $P_{SFk(max)}^c$), na qual, a resolução dos modelos mono-objetivos apresentados, não determina ponto eficiente ou deseja-se encontrar mais do que um ponto eficiente neste subintervalo, é possível refinar este subintervalo por meio de novas partições q . Neste caso, para determinar o limitante inferior e superior de cada partição q , a amplitude é calculada tal que, $C\Delta_{ck} = \frac{C_{CCTk(max)}^c - C_{CCTk(min)}^c}{N_{ck}}$ ou $P\Delta_{ck} = \frac{P_{SFk(max)}^c - P_{SFk(min)}^c}{N_{ck}}$ em que N_{ck} é o número de partições q para o subintervalo I_{ck} . Os limites inferiores ($C_{CCT_kq(min)}^c$ ou $P_{SF_kq(min)}^c$) e os limites superiores ($C_{CCT_kq(max)}^c$ ou $P_{SF_kq(max)}^c$) de cada partição q são obtidas pelas expressões (4.12) e (4.13) apresentadas a seguir:

$$C_{CCT_kq(min)}^c = C_{CCT_k(min)}^c + qC\Delta_{ck} \text{ e } C_{CCT_kq(max)}^c = C_{CCT_k(min)}^c + (q+1)C\Delta_{ck} \quad (4.12)$$

$$P_{SF_kq(min)}^c = P_{SF_k(min)}^c + qP\Delta_{ck} \text{ e } P_{SF_kq(max)}^c = P_{SF_k(min)}^c + (q+1)P\Delta_{ck} \quad (4.13)$$

sendo $q = 0, 1, 2, 3, \dots, N_{ck}-1$, $C_{CCT_k 0(min)}^c = C_{CCT_k(min)}^c$, $C_{CCT_k N_{ck}-1(max)}^c = C_{CCT_k(max)}^c$,
 $P_{SF_k 0(min)}^c = P_{SF_k(min)}^c$ e $P_{SF_k N_{ck}-1(max)}^c = P_{SF_k(max)}^c$

Isto possibilita determinar, possivelmente, um ou mais pontos eficientes no subintervalo I_{ck} que apresenta maior espaçamento entre essas soluções ou que a resolução dos modelos mono-objetivos não determinou ponto eficiente.

Os modelos multiobjetivos propostos têm restrições e funções objetivo lineares e as variáveis são binárias. Para a resolução destes modelos foi aplicado o MRCP e, em seguida, os modelos mono-objetivos foram resolvidos pelo CPLEX *Optimizer* considerando os métodos exatos desse pacote (branch-and-bound, branch-and-cut, entre outros).

No próximo capítulo são apresentados os testes numéricos realizados para cada modelo multiobjetivo definido nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3, utilizando o MRCP definido nas Seções 4.2 e 4.6, aplicado aos modelos definidos por esse como uma sequência de N_c problemas mono-objetivos definidos nas Seções 4.3, 4.4 e 4.5 com dados de variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, bem como, instâncias com 30 e 65 talhões.

Resultados da simulação computacional dos modelos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os três modelos multiobjetivos propostos. Nos testes numéricos, considerou-se 25 variedades de cana, sendo 20 de cana-de-açúcar e 5 de cana-energia. Os modelos foram testados em instâncias pequenas contendo 30 e/ou 65 talhões, devido a dificuldade de determinar pontos eficientes para instância maiores com métodos exatos. São apresentados os subintervalos obtidos para a expressão custo de plantio, cultivo, colheita e transporte (C_{CT}^c) e para a expressão produção de sacarose e fibra (P_{SF}^c) por meio do MRCP, que determina as componentes dos vetores não-dominados (quando possível) nestes subintervalos. Os testes computacionais e as soluções dos subproblemas resolvidos para cada caso foram realizados utilizando o software IBM ILOG CPLEX *Optimization studio* no ambiente de programação OPL, em um computador com processador Intel Core i5-3317U, 1.7GHz e 6GB de memória RAM, sistema operacional de 64 Bits. Em cada resolução dos modelos multiobjetivos apresentados, são construídas as curvas Pareto-Ótimo com os pontos eficientes determinados. Dentre os pontos eficientes obtidos, optou-se por apresentar os resultados, para cada caso investigado, relativo ao ponto mais próximo do ponto ideal na curva citada, no qual, é conhecido na literatura como ponto ou solução de compromisso. São apresentados para a pré-imagem deste vetor a agenda de plantio e colheita, bem como a produção de sacarose e fibra e os custos relativos ao plantio, cultivo, colheita e transporte.

5.1 Dados para testes computacionais

O modelos das Seções 4.3, 4.4 e 4.5 determinados pelo MRCP, foram implementados no *software* CPLEX *Optimization* em ambiente de programação OPL. Os modelos da Seção 4.3 foram implementados com dados de uma instância com 30 talhões, os modelos da Seção 4.4 foram implementados com dados de uma instância com 65 talhões e os modelos da Seção 4.5 foram implementados com dados das instâncias de 30 talhões e 65 talhões, todos os talhões com

áreas variando de 25 a 30 hectares. Os dados de 25 variedades de cana, sendo 5 de cana-energia (Tabela 5.1) e 20 de cana-de-açúcar (Tabela 5.2) foram usados em todos modelos. O custo de plantio, cultivo, colheita e transporte das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, foram baseados em Bigaton *et al.* (2017) e estabelecido um valor de R\$ 94,00 por tonelada para o preparo do solo, plantio, cultivo, colheita e transporte da cana planta e para a cana soca, o valor de R\$65,00 por tonelada de cultivo, colheita e transporte. A simulação foi feita para uma usina que obtém sacarose e fibra a partir da cana-de-açúcar e cana-energia com limite máximo de 300000 toneladas de moagem mensal.

Tabela 5.1 - Produtividade, porcentagem de sacarose e fibra das variedades de cana-energia em cana planta

i	$PCE_i^1(t.ha^{-1})$	$FE_i(\%)$	$SE_i(\%)$
1	205	19,9	6,4
2	236	15,35	5,29
3	175	19,55	7,23
4	173	17,96	9,23
5	155	19,8	8,74

Fonte: Matsuoka et al (2012)

Segundo Matsuoka et al (2012), o colmo de um híbrido moderno da cana-de-açúcar possui por volta de 10 a 14% de fibra e de 12% a 17% de sacarose, sendo o restante água. Já para a cana-energia tipo 2, o colmo possui entre 5 a 10% de sacarose e de 15 a 25% de fibra.

Tabela 5.2 - Produtividade, porcentagem de sacarose e fibra das variedades de cana-de-açúcar em cana planta

i	Descrição	$PCA_i^1(t.ha^{-1})$	$FA_i(\%)$	$SA_i(\%)$	i	Descrição	$PCA_i^1(t.ha^{-1})$	$FA_i(\%)$	$SA_i(\%)$
6	CTC 15	132,8	12,36	14,5	16	RB928062	113	12,38	15,75
7	CTC 9	100	12,34	15,84	17	RB966928	123,1	11,97	13,32
8	RB925211	89,29	12,30	14,67	18	CTC 20	165	11,50	13,5
9	CTC 6	136	11,16	14,98	19	CTC 17	112,3	12,38	14,98
10	RB855156	117,8	12,41	14,5	20	SP81-3250	140,6	12,91	15
11	CTC 2	129,10	12,21	14,31	21	CTC 4	130,9	11,80	13,54
12	RB857515	148,2	11,47	14,82	22	RB92579	142,4	12,93	15,7
13	SP80-1842	112,8	12,90	14,9	23	RB855453	133,35	12,38	13,9
14	SP83-2847	126,7	12,74	13,2	24	SP813250	140,6	11,2	14,2
15	SP80-3280	121,7	11,30	14,8	25	RB86755	148,2	10,9	13,8

Fonte: Nervis (2015)

5.2 Resultados do primeiro modelo multiobjetivo

O primeiro modelo multiobjetivo foi apresentado em Tolentino *et al.* (2019a) e resolvido com dados de cana-de-açúcar e cana-energia conforme as Tabelas (5.1) e (5.2) e uma instância com 30 talhões de áreas variando de 20 a 30 hectares. Aplicando o MRCP, o modelo multiobjetivo da Seção (3.1) foi apresentado conforme os modelos mono-objetivo (4.6) e (4.7) apresentados na Seção 4.3. Os modelos mono-objetivos (4.6) e (4.7) foram implantados e resolvidos pelo *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization studio* com os dados das variedades de cana-de-açúcar, cana-energia e talhões. Para as implementações, foi estipulado, no mínimo, 5000 toneladas mensais de sacarose e 5000 toneladas de fibra. O custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, foram obtidos em Bigaton *et. al* (2017).

5.2.1 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.6)

Para a determinação das soluções lexicográficas, os Problemas (4.2) e (4.3) foram implementados e resolvidos pelo *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization studio* em linguagem OPL, gerando custo mínimo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^1 = R\$4.640.000,00$, com produção de sacarose e fibra de $P_{SF(min)}^1 = 15000$ toneladas e custo máximo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(max)}^1 = R\$7.920.000,00$, com produção $P_{SF(max)}^1 = 20130$ toneladas de sacarose e fibra. Dividindo o intervalo de custos de cultivo em 5 subintervalos, determina-se a amplitude $C\Delta = R\$656.000,00$. Na Tabela (5.3) são apresentados os resultados obtidos para cada subintervalo por meio do modelo mono-objetivo (4.6).

Tabela 5.3 - Resultados em cada subintervalo obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.6) na instância com 30 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_k}^1$ (R\$)	$P_{SF_k}^1$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	4,64.10 ⁶	5,3.10 ⁶	5,29.10 ⁶	1,83.10 ⁴	50
1	5,3.10 ⁶	5,95.10 ⁶	5,94.10 ⁶	1,9.10 ⁴	620
2	5,95.10 ⁶	6,6.10 ⁶	6,59.10 ⁶	1,96.10 ⁴	512
3	6,6.10 ⁶	7,3.10 ⁶	7,29.10 ⁶	1,99.10 ⁴	120
4	7,3.10 ⁶	7,92.10 ⁶	7,91.10 ⁶	2.10 ⁴	122

A Figura (5.1) a seguir mostra a representação da curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.3).

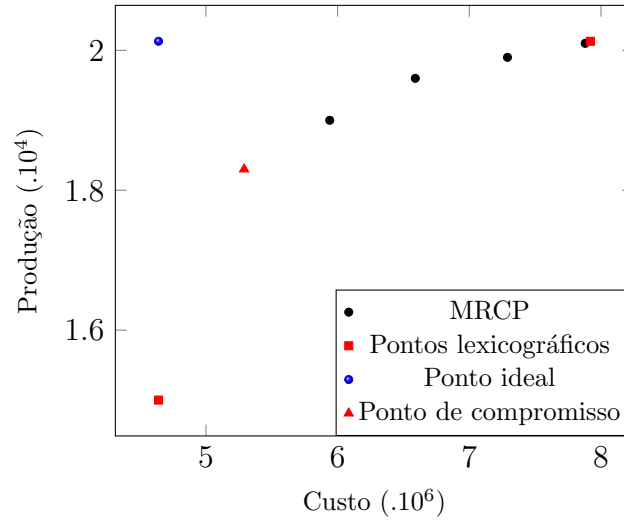


Figura 5.1: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.3).

Na curva Pareto-Ótimo representada pela Figura (5.1), a maior distância entre pontos eficientes ocorreu no subintervalo $k = 0$, definido pelo intervalo [R\$4.640.000,00, R\$5.300.000,00] relativo ao custo de plantio, cultivo, colheita e transporte. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 0$ foi dividido em 5 partes, obtendo a amplitude $C\Delta_0^1 = \text{R}\$165.000,00$. A Tabela (5.4) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.4 - Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.6) para a instância com 30 talhões

q	$C_{CCT_0q(min)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_0q(max)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^1$ (R\$)	$P_{SF_0q}^1$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	4,64.10 ⁶	4,805.10 ⁶	4,8.10 ⁶	1,62.10 ⁴	50
1	4,806.10 ⁶	4,97.10 ⁶	4,94.10 ⁶	1,71.10 ⁴	320
2	4,97.10 ⁶	5,135.10 ⁶	5,12.10 ⁶	1,78.10 ⁴	402
3	5,135.10 ⁶	5,3.10 ⁶	5,29.10 ⁶	1,83.10 ⁴	314

A Figura (5.2) mostra a curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes apresentadas nas Tabelas (5.3) e (5.4).

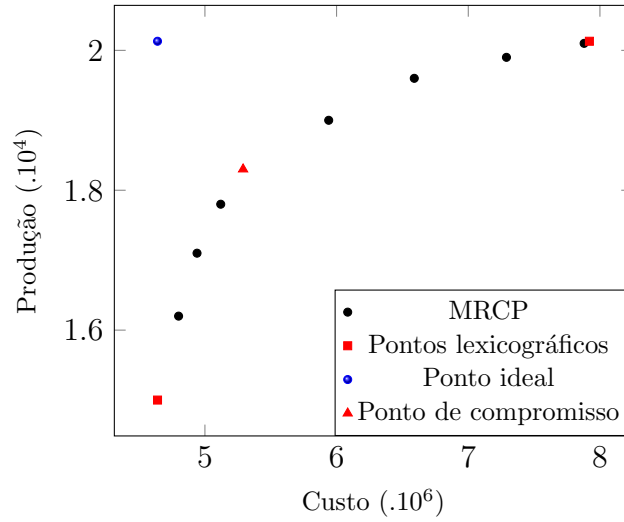


Figura 5.2: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.3) e (5.4).

As coordenadas do ponto ideal são aquelas que minimizam o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte e maximizam a produção de sacarose e fibra simultaneamente, ou seja, custo de $C_{CCT(min)}^1 = \text{R}\$4.640.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^1 = 20130$ toneladas de sacarose e fibra, representada na curva Pareto-Ótimo (Figura (5.2)) pelo círculo azul. Dentre os pontos eficientes obtidos em cada subintervalo, o ponto de compromisso (verificado por meio da distância euclidiana) é o do subintervalo $k = 0$, de custo $C_{CCT03}^1 = \text{R}\$5.290.000,00$ e produção $P_{SF03}^1 = 18300$ toneladas, sendo 8.700 toneladas de fibra e 9600 toneladas de sacarose (indicada na Figura (5.2) pelo triângulo vermelho).

Para o ponto de compromisso da resolução do modelo mono-objetivo (4.6) são representados a seguir os gráficos de setores com a porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia e cana-de açúcar selecionadas, com a porcentagem de talhões que receberam o plantio em cada mês destinando ao plantio e com a porcentagem de talhões que receberam a colheita em cada mês de colheita.

A Figura (5.3) mostra a porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia e da cana-de-açúcar, selecionadas no ponto de compromisso.

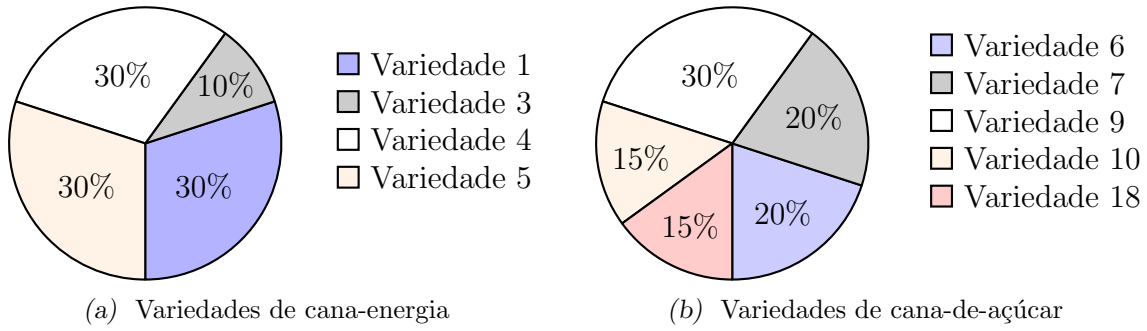


Figura 5.3: Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades selecionadas de cana-energia e da cana-de-açúcar no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.6).

Na Figura (5.4) são apresentados as porcentagens dos talhões que foram plantados em cada mês de plantio e a porcentagem de talhões que foram colhidos em cada mês do primeiro período de colheita.

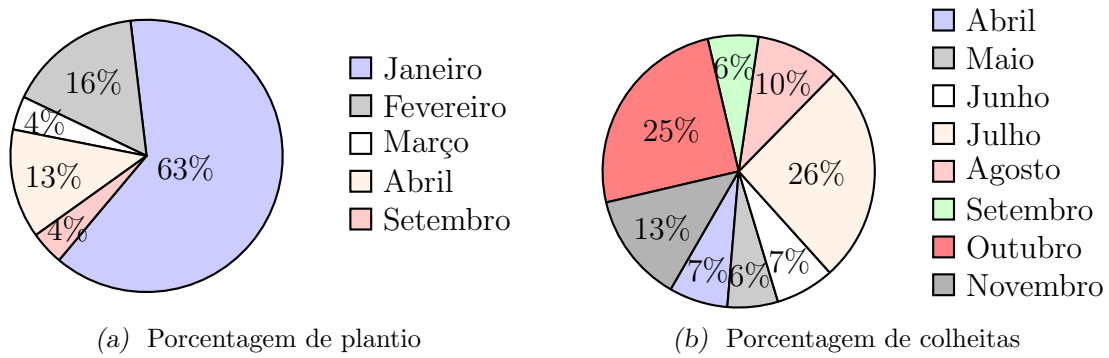


Figura 5.4: Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de colheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.6).

A Figura (5.4) mostra que mais de 70% dos talhões foram plantados entre os meses de janeiro a abril no ponto de compromisso, indicando que na instância com 30 talhões, a maioria do plantio foi de “cana de ano e meio”. Também é possível verificar que 41% dos talhões foram colhidos entre os meses de junho a agosto, mostrando um desvio do pico de maturação nulo ou mínimo.

5.2.2 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.7)

As coordenadas dos pontos lexicográficos foram determinados com a resolução os Problemas (4.2) e (4.3). Assim, os valores relativos a esses geraram custo mínimo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^1 = \text{R\$}4.640.000,00$ com produção $P_{SF(min)}^1 = 15000$ toneladas de sacarose e produção de sacarose e fibra máxima $P_{SF(max)}^1 = 20130$ toneladas com custo de plantio, cultivo, colheita e transporte máximo $C_{CCT(max)}^1 = \text{R\$}7.920.000,00$. Particionando o intervalo da

produção em 5 partes, determina-se a amplitude $P\Delta = 1000$. Na Tabela (5.5) são apresentados os resultados obtidos para cada subintervalo por meio do modelo mono-objetivo (4.7).

Tabela 5.5 - Resultados em cada subintervalo obtidos por meio da resolução modelo mono-objetivo (4.7) na instância com 30 talhões

k	$P_{SF_k(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k}^1$ ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^1 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$1,5 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$1,52 \cdot 10^4$	$4,643 \cdot 10^6$	112
1	$1,6 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	$1,61 \cdot 10^4$	$4,681 \cdot 10^6$	210
2	$1,7 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$1,701 \cdot 10^4$	$4,781 \cdot 10^6$	120
3	$1,8 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^4$	$1,801 \cdot 10^4$	$5,111 \cdot 10^6$	250
4	$1,9 \cdot 10^4$	$2,01 \cdot 10^4$	$1,901 \cdot 10^4$	$5,721 \cdot 10^6$	240

A Figura (5.5) a seguir mostra a curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes apresentados na Tabela (5.5).

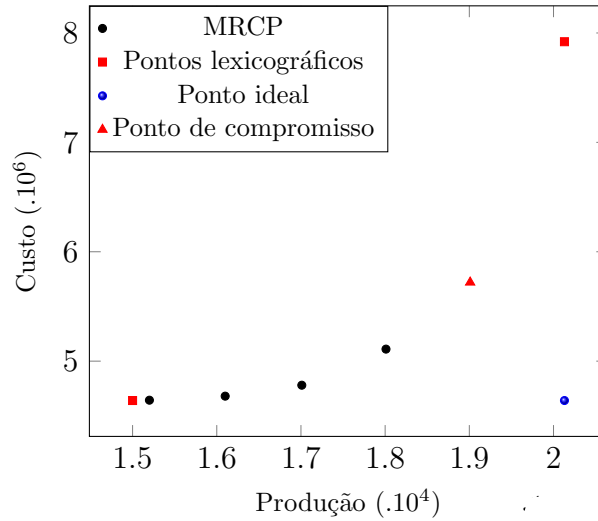


Figura 5.5: Curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes apresentados na Tabela (5.5).

Na curva Pareto-Ótimo representada pela Figura (5.5), a maior distância entre pontos eficientes ocorreu no subintervalo $k = 4$, definido pelo intervalo $[19000, 20100]$ relativo à produção de sacarose e fibra. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 4$ foi dividido em 5 partes, obtendo o resultado de amplitude $C\Delta_4^1 = 275$. A Tabela (5.6) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.6 - Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.7)

q	$P_{SF4q(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF4q(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF4q}^1 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT4q}^1 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	$1,9.10^4$	$1,93.10^4$	$1,9.10^4$	$5,72.10^6$	376
1	$1,93.10^4$	$1,955.10^4$	$1,935.10^4$	$6,12.10^6$	230
2	$1,955.10^4$	$1,98.10^4$	$1,96.10^4$	$6,56.10^6$	323
3	$1,98.10^4$	$2,01.10^4$	$1,983.10^4$	$6,98.10^6$	412

A Figura (5.6) mostra a curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.5) e (5.6).

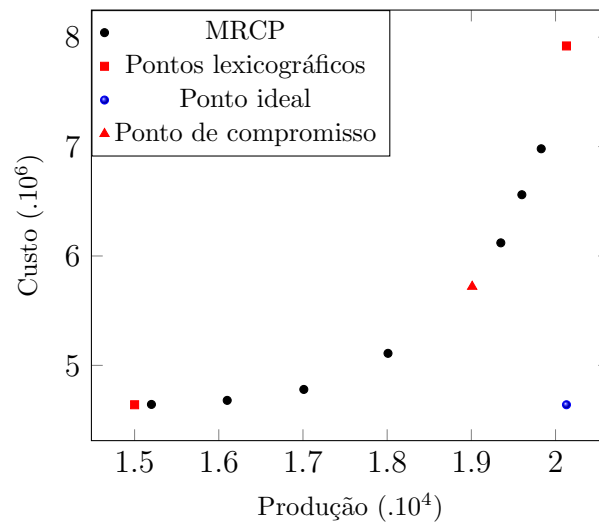


Figura 5.6: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.5) e (5.6).

Neste problema, o ponto ideal tem produção de sacarose e fibra $P_{SF(max)}^1 = 20130$ toneladas com custo $C_{CCT(min)}^1 = R\$4.640.000,00$, representada na curva Pareto-Ótimo (Figura (5.6)) pelo círculo azul. O ponto de compromisso (verificado por melhor da distância euclidiana) tem custo $C_{CCT4_0}^1 = R\$5.920.000,00$ e produção $P_{SF4_0}^1 = 19020$ toneladas de sacarose e fibra, sendo 10100 toneladas de sacarose e 8920 toneladas de fibra (indicada na Figura (5.6) pelo triângulo vermelho).

Para o ponto de compromisso obtido pela resolução do modelo mono-objetivo (4.7) são representados a seguir, gráficos de setores com a porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia e cana-de-açúcar selecionadas, com a porcentagem de talhões que receberam o plantio em cada mês de plantio e com a porcentagem de talhões que receberam a colheita em cada mês de colheita.

A Figura (5.7) mostra a porcentagem de talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-energia e cana-de-açúcar selecionadas no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo

(4.7).

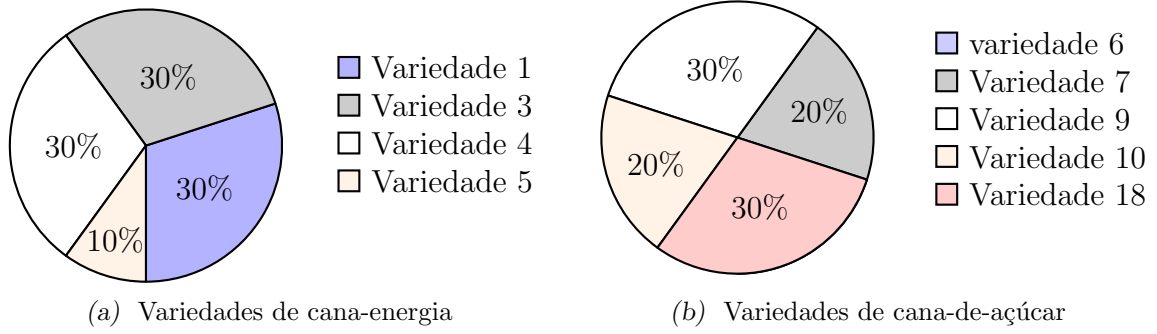


Figura 5.7: Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades selecionadas de cana-energia e da cana-de-açúcar no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.7).

Na Figura (5.8) são apresentados as porcentagens dos talhões que receberam o plantio em cada mês de plantio e a porcentagem de talhões que foram colhidos em cada mês da primeira colheita no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.7).

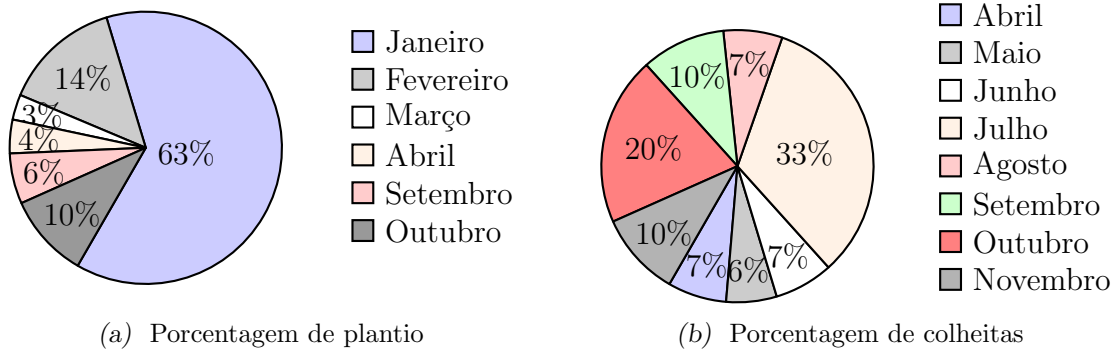


Figura 5.8: Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de colheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.7).

Observando a Figura (5.8a) é possível afirmar que 84% dos talhões receberam o plantio de “cana de ano e meio” por ser plantadas no período de janeiro a abril e, portanto, 16% dos talhões receberam o plantio da “cana de ano” que são plantadas no período de setembro ao final de outubro. Nota-se também, pela Figura (5.8b) que mais da metade dos talhões foram colhidos próximo a julho, evidenciando assim, o pouco ou nenhum desvio do pico de maturação.

5.3 Resultados do segundo modelo multiobjetivo

O segundo modelo multiobjetivo foi apresentado em Tolentino *et al.* (2019b) e resolvido com dados de cana-de-açúcar e cana-energia conforme as Tabelas (5.1) e (5.2) e uma instância com

65 talhões de áreas variando de 20 a 30 hectares. Aplicando o MRCP, o modelo multiobjetivo da Seção (3.2) foi apresentado conforme os modelos mono-objetivo (4.8) e (4.9) sendo, cada um destes, implementado e resolvido no *software* IBM ILOG CPLEX em linguagem OPL, com os dados das variedades de cana-de-açúcar, cana-energia e talhões, conforme as Tabelas (5.1) e (5.2). Para essa implementação, foi estipulado, no mínimo, 5000 toneladas mensais de sacarose e 5000 toneladas de fibra. O custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, foram obtidos em Bigaton *et al.* (2017).

5.3.1 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.8)

Para a determinar as coordenadas dos pontos lexicográficos, os Problema (4.2) e (4.3) foram resolvidos gerando custo mínimo $C_{CCT(min)}^1 = R\$10.131.000,00$ com produção mínima de sacarose e fibra $P_{SFA(min)}^1 = 45500$ toneladas e custo máximo $C_{CCT(max)}^1 = R\$17.023.000,00$ com produção $P_{SFA(max)}^1 = 64550,6$ toneladas de sacarose e fibra. Dividindo o intervalo dos custos de plantio, cultivo, colheita e transporte em 10 partes, determina-se a amplitude $C\Delta = R\$689.200,00$. Na Tabela (5.7) são apresentados os limitantes inferior e superior para cada intervalo, obtidos pelas expressões (4.4) e, para cada subintervalo, o custo (C_{CCT}^1), a produção de sacarose e fibra (P_{SFA}^1) e tempo (em segundos) de solução da implementação problema mono-objetivo (4.8).

Tabela 5.7 - Resultados obtidos em cada subintervalo por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.8) na instância com 65 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_k}^1$ (R\$)	$P_{SFA_k}^1$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	10,13.10 ⁶	10,82.10 ⁶	10,81.10 ⁶	5,6.10 ⁴	76
1	10,82.10 ⁶	11,51.10 ⁶	11,5.10 ⁶	5,75.10 ⁴	600
2	11,51.10 ⁶	12,2.10 ⁶	12,19.10 ⁶	5,9.10 ⁴	526
3	12,2.10 ⁶	12,89.10 ⁶	12,88.10 ⁶	6.10 ⁴	851
4	12,89.10 ⁶	13,58.10 ⁶	13,57.10 ⁶	6,1.10 ⁴	80
5	13,58.10 ⁶	14,27.10 ⁶	14,26.10 ⁶	6,2.10 ⁴	87
6	14,27.10 ⁶	14,96.10 ⁶	14,95.10 ⁶	6,25.10 ⁴	88
7	14,96.10 ⁶	15,65.10 ⁶	15,64.10 ⁶	6,33.10 ⁴	66
8	15,65.10 ⁶	16,33.10 ⁶	16,328.10 ⁶	6,4.10 ⁴	84
9	16,33.10 ⁶	17,023.10 ⁶	17,02.10 ⁶	6,45.10 ⁴	88

Desta forma, o ponto ideal tem coordenadas com produção $P_{SFA(max)}^1 = 64550$ toneladas de sacarose e fibra com custo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^1 = R\$10.131.000,00$, representada na curva Pareto-Ótimo (Figura (5.9)) pelo círculo azul. Dentre os pontos eficientes

obtidos em cada subintervalo, o ponto de compromisso (verificado por meio da distância Euclidiana) pertence ao subintervalo $k = 1$, de custo $C_{CCT_1}^1 = \text{R}\$11.500.000,00$ e produção de sacarose e fibra $P_{SFA_1}^1 = 57500$ toneladas, sendo 31400 toneladas de sacarose e 26100 toneladas de fibra (indicada na Figura (5.9) pelo triângulo vermelho).

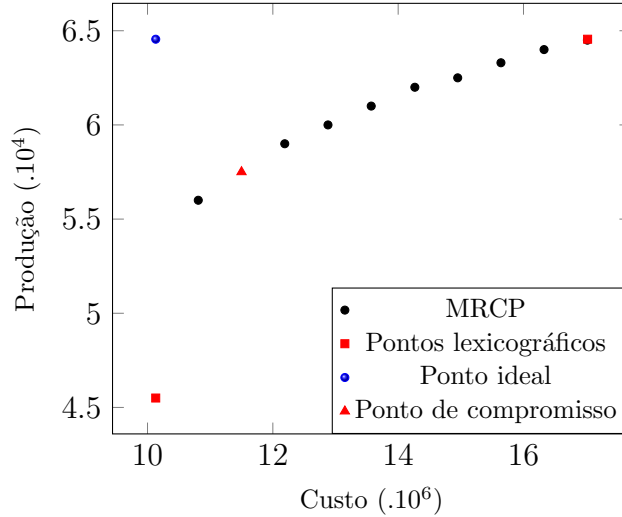


Figura 5.9: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.7).

Na curva Pareto-Ótimo representada pela Figura (5.9), a maior distância entre pontos eficientes ocorreu no subintervalo $k = 0$, definido pelo intervalo $[\text{R}\$10.130.000,00, \text{R}\$10.820.000,00]$ relativo ao custo de plantio, cultivo, colheita e transporte. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 0$ foi dividido em 5 partes, obtendo a amplitude $C\Delta_0^1 = \text{R}\$138.000,00$. A Tabela (5.8) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.8 - Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.8) para a instância com 65 talhões

q	$C_{CCT_0q}^1$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^1$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^1$ (R\$)	$P_{SFA_0q}^1$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	10,13.10 ⁶	10,268.10 ⁶	10,25.10 ⁶	4,6.10 ⁴	345
1	10,268.10 ⁶	10,406.10 ⁶	10,38.10 ⁶	4,8.10 ⁴	540
2	10,406.10 ⁶	10,544.10 ⁶	10,47.10 ⁶	4,96.10 ⁴	380
3	10,544.10 ⁶	10,682.10 ⁶	10,64.10 ⁶	5,23.10 ⁴	620
4	10,682.10 ⁶	10,82.10 ⁶	10,81.10 ⁶	5,6.10 ⁴	323

A Figura (5.10) mostra a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.7) e (5.8).

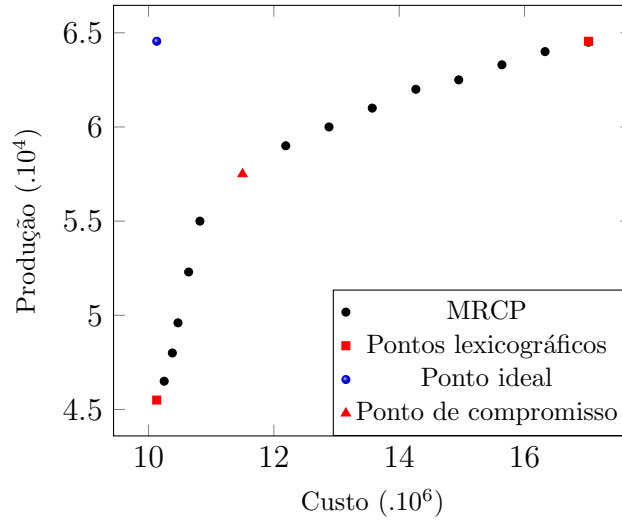


Figura 5.10: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.7) e (5.8).

Para o ponto de compromisso obtido pela resolução do modelo mono-objetivo (4.8) são representados a seguir, gráficos de setores com a porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia e cana-de-açúcar selecionadas, com a porcentagem de talhões que receberam o plantio em cada mês de plantio e com a porcentagem de talhões que receberam a colheita em cada mês de colheita.

A Figura (5.11) mostra a porcentagem de talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-energia e cana-de-açúcar selecionadas no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.8).

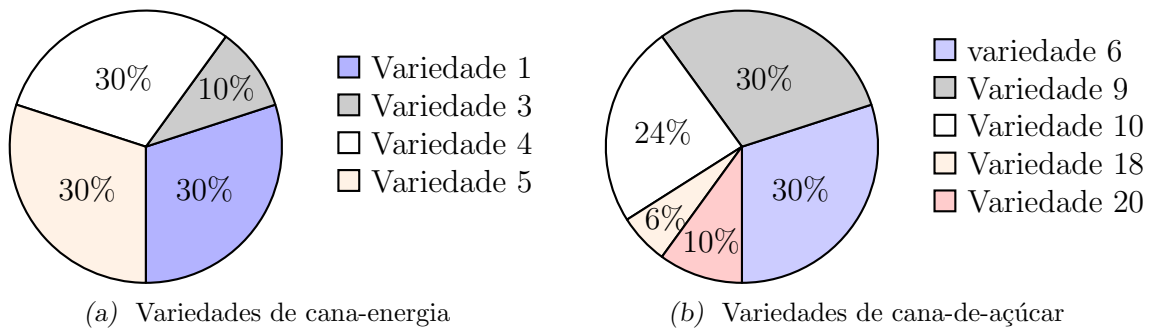


Figura 5.11: Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades selecionadas de cana-energia e da cana-de-açúcar no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.8).

Na Figura (5.12) são apresentados as porcentagens dos talhões que receberam o plantio em cada mês de plantio e a porcentagem de talhões que foram colhidos em cada mês da primeira colheita no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.8).

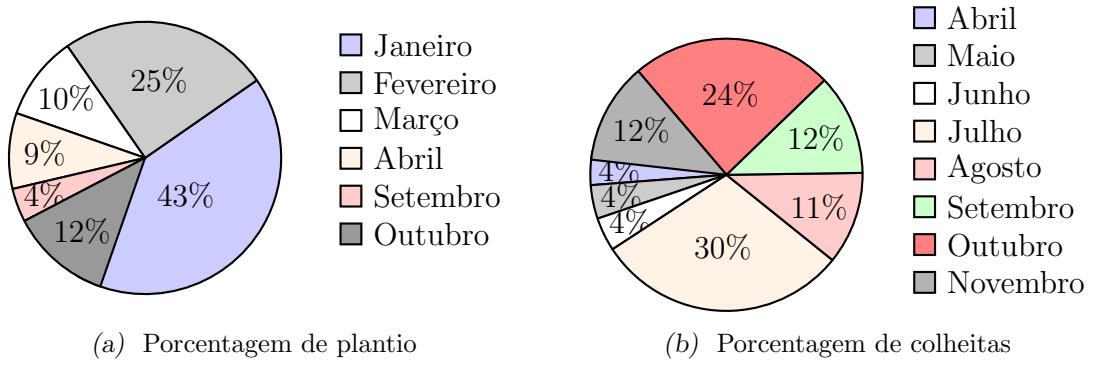


Figura 5.12: Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de colheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.8).

Observando a Figura (5.12a) é possível afirmar que 87% dos talhões receberam o plantio de “cana de ano e meio” por ser plantadas no período de janeiro a abril e, portanto, 13% dos talhões receberam o plantio da “cana de ano” que são plantadas no período de setembro a final de outubro. Nota-se também, pela Figura (5.12b) que 45% dos talhões foram colhidos próximo ao mês de julho, evidenciando assim, o pouco ou nenhum desvio do pico de maturação.

5.3.2 Resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.9)

Por meio das coordenadas dos pontos lexicográficos resolvidos pelos Problemas (4.2) e (4.3), determina-se a amplitude dividindo o intervalo da produção de sacarose e fibra em 10 subintervalos, ou seja, $P\Delta = 1905$. Na Tabela (5.9) são apresentados os limitantes inferior e superior para cada subintervalo, obtidos pelas expressões (4.5) e, para cada subintervalo, o custo (C_{CCT}^1), produção de sacarose e fibra (P_{SFA}^1) e tempo (em segundos) de solução da implementação do modelo mono-objetivo (4.9).

Tabela 5.9 - Resultados em cada subintervalo por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.9) na instância com 65 talhões

k	$P_{SFAk(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SFAk(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFAk}^1 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^1 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	4,55.10 ⁴	4,74.10 ⁴	4,7.10 ⁴	10,13.10 ⁶	92
1	4,74.10 ⁴	4,93.10 ⁴	4,74.10 ⁴	10,132.10 ⁶	82
2	4,93.10 ⁴	5,12.10 ⁴	4,93.10 ⁴	10,17.10 ⁶	78
3	5,12.10 ⁴	5,32.10 ⁴	5,12.10 ⁴	10,2.10 ⁶	602
4	5,32.10 ⁴	5,5.10 ⁴	5,32.10 ⁴	10,3.10 ⁶	75
5	5,5.10 ⁴	5,7.10 ⁴	5,51.10 ⁴	10,45.10 ⁶	87
6	5,7.10 ⁴	5,9.10 ⁴	5,71.10 ⁴	10,68.10 ⁶	132
7	5,9.10 ⁴	6,1.10 ⁴	5,91.10 ⁴	11,10.10 ⁶	660
8	6,1.10 ⁴	6,26.10 ⁴	6,11.10 ⁴	12,22.10 ⁶	620
9	6,26.10 ⁴	6,45.10 ⁴	6,261.10 ⁴	14,34.10 ⁶	618

Neste caso, o ponto ideal tem coordenadas de produção de $P_{SFA(max)}^1 = 64550$ toneladas de sacarose e fibra e custo de $C_{CCT(min)}^1 = R\$10.131.000,00$, representada na curva Pareto-Ótimo (Figura (5.13)) pelo círculo azul. O ponto de compromisso (verificada por meio da distância Euclidiana) pertence ao subintervalo $k = 8$, com $C_{CCT8}^1 = R\$13.616.000,00$ de custo e produção de sacarose e fibra $P_{SFA8}^1 = 61050$ toneladas, sendo 28200 toneladas de sacarose e 32850 toneladas de fibra (indicada na Figura (5.13) pelo triângulo vermelho).

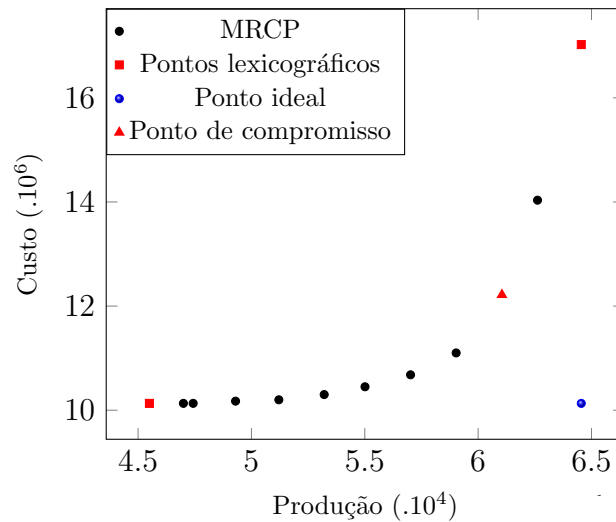


Figura 5.13: Curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes na Tabela (5.9).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.13), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 9$ de extremos $[62600, 64500]$ relativo à produção de sacarose e fibra.

Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $P\Delta_9^1 = 380$. Na Tabela (5.10) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.10 - Resultados para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.9) para a instância com 65 talhões

q	$P_{SF9q(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^1 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^1 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	6,26.10 ⁴	6,298.10 ⁴	6,27.10 ⁴	13.10 ⁶	376
1	6,298.10 ⁴	6,336.10 ⁴	6,3.10 ⁴	13,84.10 ⁶	230
2	6,336.10 ⁴	6,374.10 ⁴	6,34.10 ⁴	14,28.10 ⁶	323
3	6,374.10 ⁴	6,412.10 ⁴	6,38.10 ⁴	15,22.10 ⁶	412
4	6,412.10 ⁴	6,45.10 ⁴	6,42.10 ⁴	16,44.10 ⁶	412

A Figura (5.14) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.9) e (5.10).

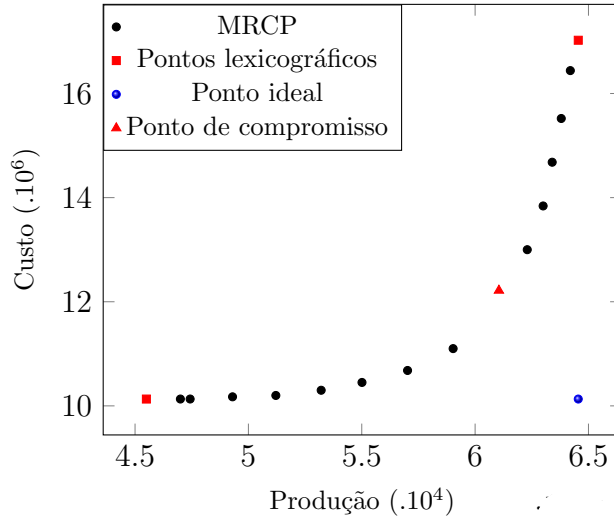


Figura 5.14: Curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes nas Tabelas (5.9) e (5.10).

Para o ponto de compromisso obtido na resolução do modelo mono-objetivo (4.9) são representados gráficos de setores com a porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia e cana-de-açúcar selecionadas, com a porcentagem de talhões que receberam o plantio em cada mês de plantio e com a porcentagem de talhões que receberam a colheita em cada mês de colheita.

A Figura (5.15) apresenta a porcentagem de talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-energia e cana-de-açúcar selecionadas no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.9).

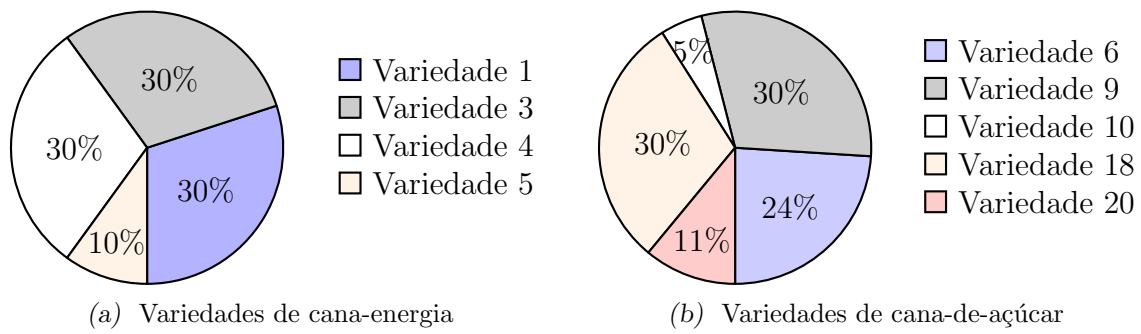


Figura 5.15: Porcentagem de talhões que receberam o plantio das variedades de cana-energia e da cana-de-açúcar, selecionadas no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.9).

Na Figura (5.16) são apresentados as porcentagens dos talhões que receberam o plantio em cada mês de plantio e a porcentagem de talhões que foram colhidos em cada mês da primeira colheita no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.9).

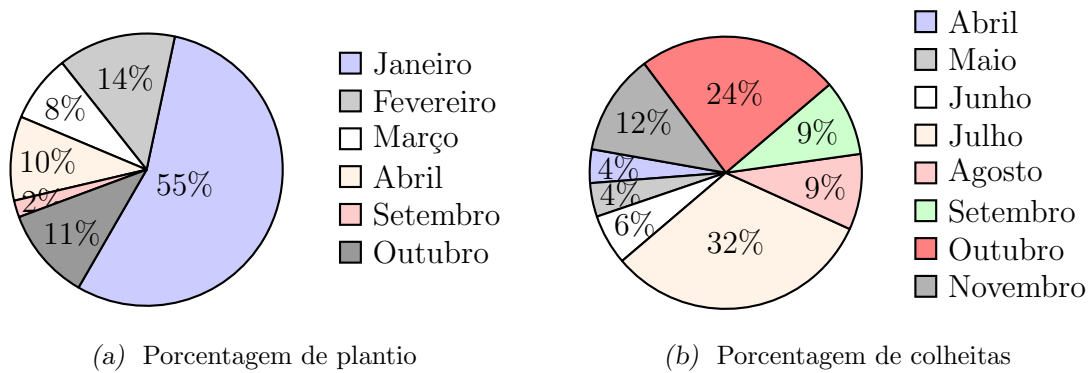


Figura 5.16: Porcentagem de talhões plantados em cada mês de plantio e porcentagem de colheita em cada mês do primeiro período de colheita no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.9).

Observando as Figuras (5.16a) é possível afirmar que 87% dos talhões receberam o plantio de “cana de ano e meio” por ser plantadas no período de janeiro a abril e, portanto, 13% dos talhões receberam o plantio da “cana de ano” que são plantadas no período de setembro a final de outubro. Nota-se também, pela Figura (5.16b) que 47% dos talhões foram colhidos próximo ao mês de julho, indicando o mínimo desvio do pico de maturação.

5.4 Resultados do terceiro modelo multiobjetivo

O modelo multiobjetivo que seleciona variedades de cana-de-açúcar e cana-energia para o plantio e multiplas colheitas, conforme mostrado na Seção (3.3) foi transformado pelo MRCP em conjuntos de subproblemas mono-objetivos de acordo com (4.10) e (4.11). A implementação dos

modelos mono-objetivos foi realizada com dados de instâncias com 30 e 65 talhões, 5 variedades de cana-energia (Tabela 5.1) e 20 variedades de cana-de-açúcar (Tabela 5.2) para quatro colheitas. Para essa implementação, foi estipulado, no mínimo, 5000 toneladas mensais de sacarose e 5000 toneladas de fibra. O custo de plantio, cultivo, colheita e transporte, foram obtidos em Bigaton *et al.* (2017).

A seguir são apresentados os pontos lexicográficos de cada colheita, obtidos com a implementação e resolução dos modelos mono-objetivos (4.2) e (4.3) no *software* IBM ILOG CPLEX em ambiente OPL em instâncias de 30 e 65 talhões.

5.4.1 Pontos lexicográficos para cada período de colheita na instância com 30 talhões

Resolvendo os modelos (4.2) e (4.3) por meio do *software* IBM ILOG CPLEX em ambiente OPL, obtêm-se as soluções lexicográficas para cada colheita do modelo multiobjetivo (3.3). Dividindo os intervalos do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte e da produção de sacarose e fibra de cada colheita em 10 subintervalos, determinam-se as amplitudes para o custo e para a produção. Na Tabela 5.11 são apresentadas as soluções lexicográficas e as amplitudes para cada colheita.

Tabela 5.11 - Pontos lexicográficos e amplitudes para cada colheita da instância com 30 talhões

c	$C_{CCT(min)}^c$ (R\$)	$C_{CCT(max)}^c$ (R\$)	$P_{SF(min)}^c$ (t.ha ⁻¹)	$P_{SF(max)}^c$ (t.ha ⁻¹)	$C\Delta_c$ (R\$)	$P\Delta_c$ (t.ha ⁻¹)
1	7,18.10 ⁶	8,96.10 ⁶	2,83.10 ⁴	3,76.10 ⁴	1,78.10 ⁵	9,3.10 ²
2	7,05.10 ⁶	8,8.10 ⁶	2,95.10 ⁴	3,77.10 ⁴	1,75.10 ⁵	8,2.10 ²
3	7,002.10 ⁶	8,67.10 ⁶	2,9.10 ⁴	3,77.10 ⁴	1,67.10 ⁵	8,7.10 ²
4	6,98.10 ⁶	8,58.10 ⁶	3,01.10 ⁴	3,8.10 ⁴	1,6.10 ⁵	8.10 ²
Total	28,15.10 ⁶	35,01.10 ⁶	1,17.10 ⁵	1,51.10 ⁵	6,86.10 ⁶	3,4.10 ³

Assim, com os resultados da Tabela 5.11 é possível obter pontos eficientes para cada subintervalo, em cada colheita, por meio da implementação e resolução dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).

5.4.2 Resultados do plantio e primeira colheita na instância com 30 talhões

A Tabela 5.12 mostra os resultados obtidos com a implementação e resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar e cana-energia para o plantio e primeira colheita na instância com 30 talhões.

Tabela 5.12 - Resultado para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.

k	$C_{SF_k(min)}^1$ (R\$)	$C_{SF_k(max)}^1$ (R\$)	C_{SF}^1 (R\$)	P_{SF}^1 (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	7,18.10 ⁶	7,36.10 ⁶	7,32.10 ⁶	3,21.10 ⁴	81
1	7,36.10 ⁶	7,54.10 ⁶	7,52.10 ⁶	3,46.10 ⁴	300
2	7,54.10 ⁶	7,72.10 ⁶	7,71.10 ⁶	3,58.10 ⁴	150
3	7,72.10 ⁶	7,9.10 ⁶	7,88.10 ⁶	3,67.10 ⁴	200
4	7,9.10 ⁶	8,07.10 ⁶	8,02.10 ⁶	3,7.10 ⁴	80
5	8,07.10 ⁶	8,25.10 ⁶	8,21.10 ⁶	3,73.10 ⁴	120
6	8,25.10 ⁶	8,43.10 ⁶	8,39.10 ⁶	3,74.10 ⁴	65
7	8,43.10 ⁶	8,6.10 ⁶	8,57.10 ⁶	3,75.10 ⁴	80
8	8,6.10 ⁶	8,78.10 ⁶	8,75.10 ⁶	3,752.10 ⁴	220
9	8,78.10 ⁶	8,96.10 ⁶	8,95.10 ⁶	3,753.10 ⁴	320

Neste caso, o ponto ideal tem coordenadas com custo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^1 = \text{R\$}7.180.000,00$ e $P_{SF(max)}^1 = 37600$ toneladas de produção de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.17) pelo círculo azul; nesta curva Pareto-Ótimo, o ponto de compromisso, pertencente ao subintervalo $k = 1$, (indicado pelo triângulo vermelho na Figura (5.17)), de custo $C_{CCT1}^1 = \text{R\$}7.520.000,00$ e produção de $P_{SF1}^1 = 33000$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

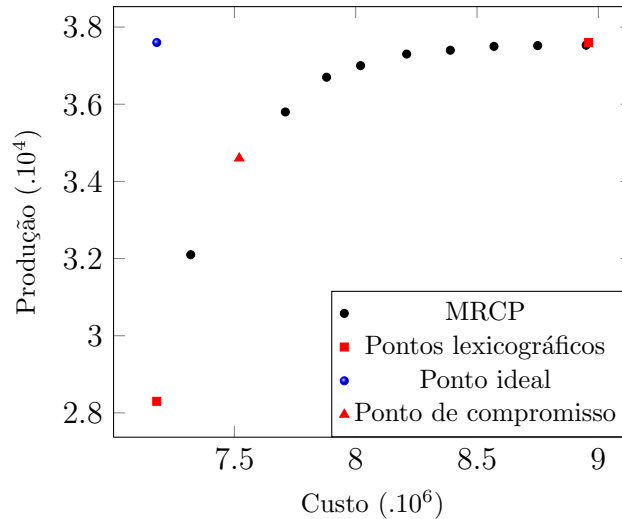


Figura 5.17: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.12).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.17), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 0$ de extremos $[\text{R\$}7.180.000,00, \text{R\$}7.360.000,00]$ relativo ao custo

de cultivo, colheita e transporte. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $C\Delta_0^1 = \text{R\$}36.000,00$. Na Tabela (5.13) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.13 - Resultados para o plantio e primeira nas partições com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões

q	$C_{CCT_0q(min)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_0q(max)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^2$ (R\$)	$P_{SF_0q}^2$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	7,18.10 ⁶	7,216.10 ⁶	7,2.10 ⁶	2,9.10 ⁴	345
1	7,216.10 ⁶	7,252.10 ⁶	7,23.10 ⁶	3,1.10 ⁴	540
2	7,252.10 ⁶	7,288.10 ⁶	7,26.10 ⁶	3,18.10 ⁴	380
3	7,288.10 ⁶	7,324.10 ⁶	7,31.10 ⁶	3,25.10 ⁴	620
4	7,324.10 ⁶	7,36.10 ⁶	7,34.10 ⁶	3,38.10 ⁴	323

A Figura (5.18) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.12) e (5.13).

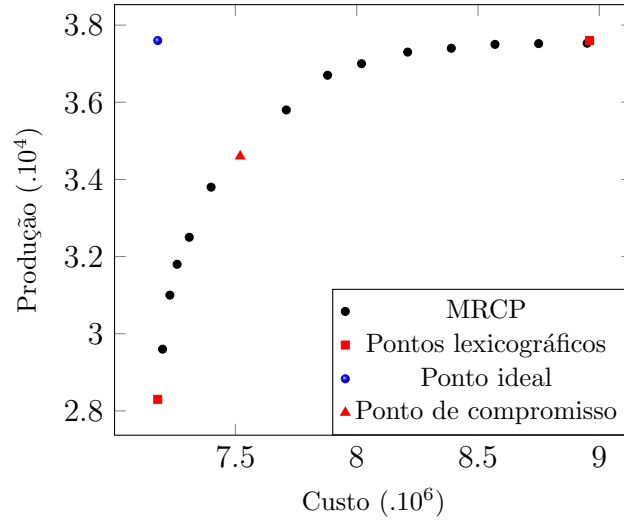


Figura 5.18: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.12) e (5.13).

A Tabela (5.14) apresenta os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) em cada subintervalo da produção de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia para o plantio e primeira colheita na instância com 30 talhões.

Tabela 5.14 - Resultado para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões

k	$P_{SF_k(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k}^1$ ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^1 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	2,83.10 ⁴	2,92.10 ⁴	2,88.10 ⁴	7,19.10 ⁶	81
1	2,92.10 ⁴	3,02.10 ⁴	2,96.10 ⁴	7,195.10 ⁶	300
2	3,02.10 ⁴	3,11.10 ⁴	3,08.10 ⁴	7,2.10 ⁶	150
3	3,11.10 ⁴	3,2.10 ⁴	3,14.10 ⁴	7,22.10 ⁶	200
4	3,2.10 ⁴	3,29.10 ⁴	3,23.10 ⁴	7,3.10 ⁶	80
5	3,29.10 ⁴	3,39.10 ⁴	3,33.10 ⁴	7,35.10 ⁶	120
6	3,39.10 ⁴	3,48.10 ⁴	3,4.10 ⁴	7,44.10 ⁶	65
7	3,48.10 ⁴	3,57.10 ⁴	3,49.10 ⁴	7,58.10 ⁶	80
8	3,57.10 ⁴	3,67.10 ⁴	3,58.10 ⁴	7,8.10 ⁶	220
9	3,67.10 ⁴	3,76.10 ⁴	3,69.10 ⁴	8,12.10 ⁶	320

Neste caso, o ponto de compromisso (ponto ideal tem custo $C_{CCT(min)}^1 = R\$7.180.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^1 = 37600$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.19) pelo círculo azul) é o ponto eficiente do subintervalo $k = 8$, (representado na Figura (5.19) pelo triângulo vermelho), com $C_{CCT8}^1 = R\$7.800.000,00$ de custo e produção $P_{SF8}^1 = 35800$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

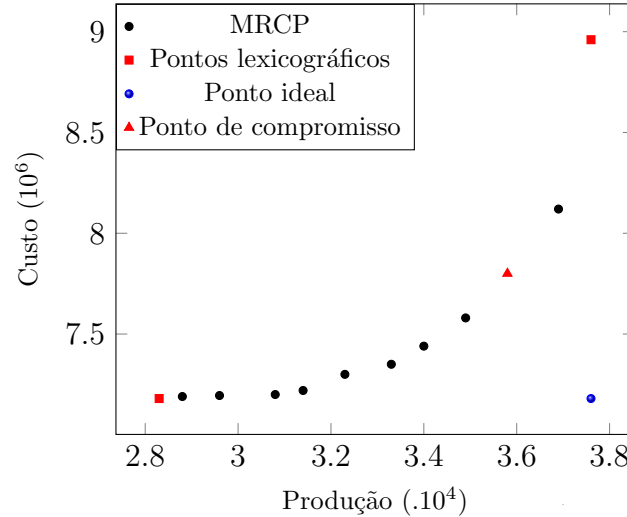


Figura 5.19: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.14).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.19), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 9$ de extremos $[36700, 37600]$ relativo à produção de sacarose e fibra. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando

a amplitude $P\Delta_9^1 = 180$. Na Tabela (5.15) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.15 - Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) no plantio e primeira colheita da instância com 30 talhões.

q	$P_{SF9q(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^1 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^1 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$3,67.10^4$	$3,688.10^4$	$3,687.10^4$	$7,85.10^6$	376
1	$3,688.10^4$	$3,706.10^4$	$3,7.10^4$	$8,1.10^6$	230
2	$3,706.10^4$	$3,724.10^4$	$3,71.10^4$	$8,32.10^6$	323
3	$3,724.10^4$	$3,742.10^4$	$3,73.10^4$	$8,44.10^6$	412
4	$3,742.10^4$	$3,76.10^4$	$3,75.10^4$	$8,78.10^6$	412

A Figura (5.20) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes das Tabelas (5.14) e (5.15).

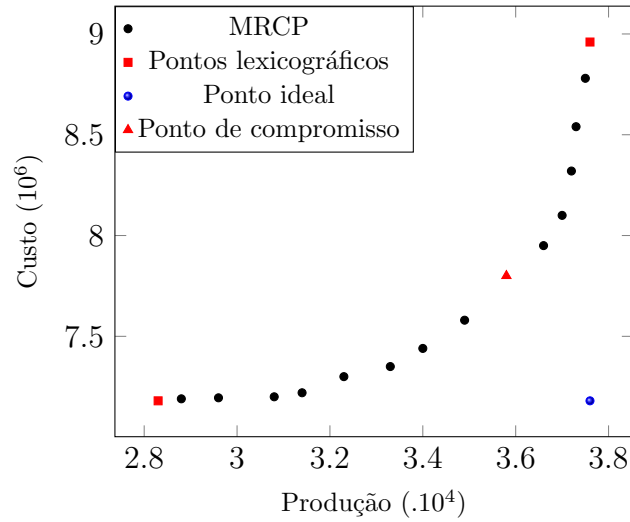


Figura 5.20: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.14) e (5.15).

5.4.3 Resultados da segunda colheita na instância com 30 talhões

A Tabela (5.16) apresenta os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de cultivo, colheita e transporte para o segundo período de colheita na instância com 30 talhões.

Tabela 5.16 - Resultado para a segunda colheita com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_k}^2$ (R\$)	$P_{SF_k}^2$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	7,05.10 ⁶	7,22.10 ⁶	7,19.10 ⁶	3,3.10 ⁴	81
1	7,22.10 ⁶	7,4.10 ⁶	7,34.10 ⁶	3,6.10 ⁴	120
2	7,4.10 ⁶	7,57.10 ⁶	7,56.10 ⁶	3,67.10 ⁴	150
3	7,57.10 ⁶	7,75.10 ⁶	7,74.10 ⁶	3,7.10 ⁴	80
4	7,75.10 ⁶	7,93.10 ⁶	7,79.10 ⁶	3,72.10 ⁴	80
5	7,93.10 ⁶	8,1.10 ⁶	8,09.10 ⁶	3,72.10 ⁴	120
6	8,1.10 ⁶	8,27.10 ⁶	8,26.10 ⁶	3,73.10 ⁴	100
7	8,27.10 ⁶	8,45.10 ⁶	8,44.10 ⁶	3,736.10 ⁴	120
8	8,45.10 ⁶	8,63.10 ⁶	8,6.10 ⁶	3,74.10 ⁴	220
9	8,63.10 ⁶	8,8.10 ⁶	8,79.10 ⁶	3,76.10 ⁴	110

Para a segunda colheita na instância com 30 talhões, o ponto ideal tem custo de cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^2 = \text{R\$}7.050.000,00$ e produção de $P_{SF(max)}^2 = 37700$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.21) pelo círculo azul. Nesta curva Pareto-Ótimo, o ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 1$ (indicada pelo triângulo vermelho na Figura (5.21)) com custo de $C_{CCT1}^2 = \text{R\$}7.340.000,00$ e produção de $P_{SF1}^2 = 34000$ toneladas de sacarose e fibra provenientes da cana-de-açúcar e cana-energia.

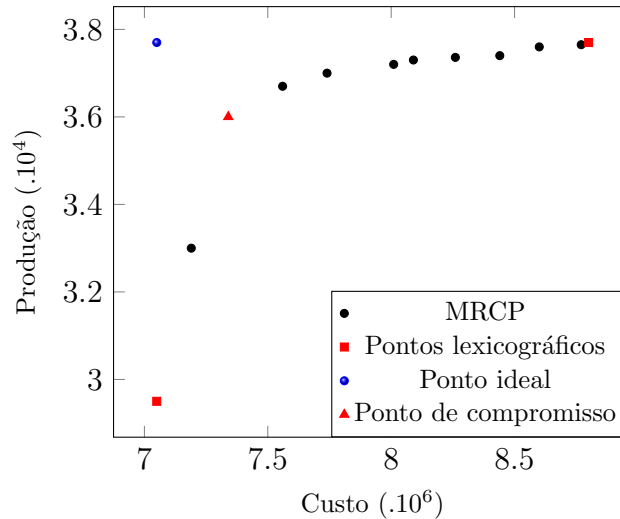


Figura 5.21: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.16).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.21), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 0$ de extremos $[\text{R\$}7.050.000,00, \text{R\$}7.220.000,00]$ relativo ao custo

de cultivo, colheita e transporte. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $C\Delta_0^2 = \text{R\$}34.000,00$. Na Tabela (5.17) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.17 - Resultados da segunda colheita nas partições com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões

q	$C_{CCT_0q(min)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_0q(max)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^2$ (R\$)	$P_{SF_0q}^2$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	7,05.10 ⁶	7,084.10 ⁶	7,08.10 ⁶	3,05.10 ⁴	345
1	7,084.10 ⁶	7,118.10 ⁶	7,1.10 ⁶	3,2.10 ⁴	540
2	7,118.10 ⁶	7,152.10 ⁶	7,13.10 ⁶	3,31.10 ⁴	380
3	7,152.10 ⁶	7,186.10 ⁶	7,16.10 ⁶	3,38.10 ⁴	620
4	7,186.10 ⁶	7,22.10 ⁶	7,21.10 ⁶	3,45.10 ⁴	323

A Figura (5.22) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.16) e (5.17).

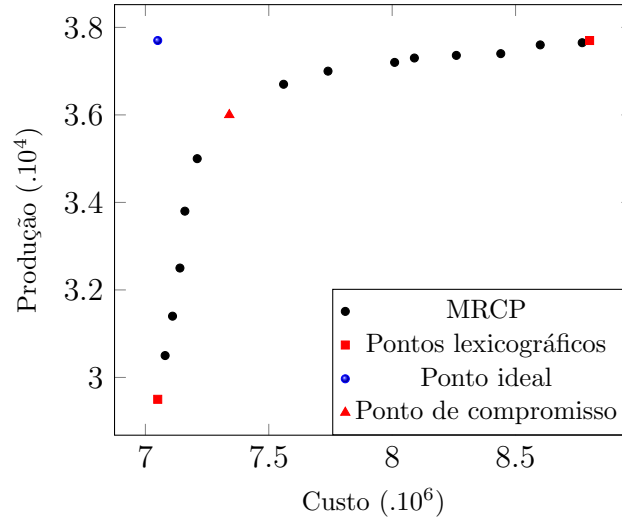


Figura 5.22: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.16) e (5.17).

A Tabela (5.18) apresenta os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) em cada subintervalo da produção de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia para o segundo período de colheita na instância com 30 talhões.

Tabela 5.18 - Resultado para a segunda colheita da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões

k	$P_{SF_k(min)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k}^2$ ($t.ha^{-1}$)	$C_{CCT_k}^2$ (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	2,95.10 ⁴	3,03.10 ⁴	3.10 ⁴	7,04.10 ⁶	81
1	3,03.10 ⁴	3,11.10 ⁴	3,07.10 ⁴	7,05.10 ⁶	120
2	3,11.10 ⁴	3,19.10 ⁴	3,12.10 ⁴	7,07.10 ⁶	150
3	3,19.10 ⁴	3,29.10 ⁴	3,18.10 ⁴	7,1.10 ⁶	80
4	3,29.10 ⁴	3,36.10 ⁴	3,3.10 ⁴	7,16.10 ⁶	80
5	3,36.10 ⁴	3,44.10 ⁴	3,34.10 ⁴	7,23.10 ⁶	120
6	3,44.10 ⁴	3,52.10 ⁴	3,46.10 ⁴	7,35.10 ⁶	100
7	3,52.10 ⁴	3,61.10 ⁴	3,53.10 ⁴	7,45.10 ⁶	120
8	3,61.10 ⁴	3,69.10 ⁴	3,62.10 ⁴	7,56.10 ⁶	220
9	3,69.10 ⁴	3,77.10 ⁴	3,7.10 ⁴	7,88.10 ⁶	110

Assim, resolvendo o modelo mono-objetivo (4.11) na segunda colheita, obtém-se como coordenadas do ponto ideal, custo de $C_{CCT(min)}^2 = \text{R\$}7050.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^2 = 37700$ toneladas de sacarose e fibra, indicada pelo círculo azul na Figura (5.23). O ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 8$ (representada na Figura (5.23) pelo triângulo vermelho), de custo $C_{CCT8}^2 = \text{R\$}7.710.000,00$ e produção $P_{SF8}^2 = 35700$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

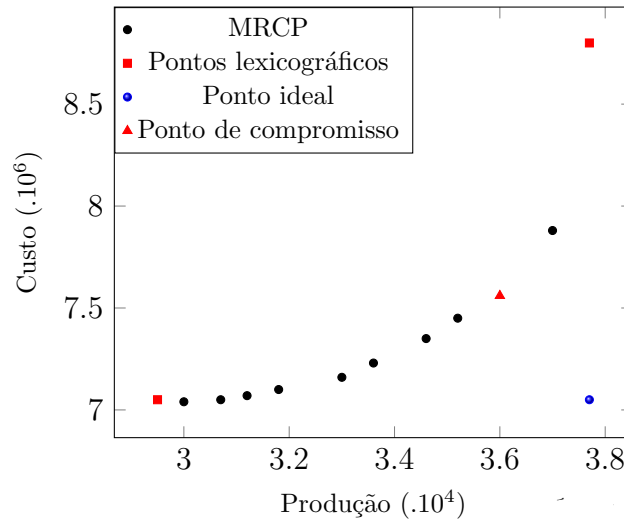


Figura 5.23: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.18).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.23), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 9$ de extremos $[36900, 37700]$ relativo à produção de sacarose e fibra.

Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $P\Delta_9^2 = 160$. Na Tabela (5.19) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.19 - Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na segunda colheita da instância com 30 talhões.

q	$P_{SF9q(min)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^2 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^2 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	$3,69.10^4$	$3,706.10^4$	$3,7.10^4$	$7,6.10^6$	376
1	$3,706.10^4$	$3,722.10^4$	$3,71.10^4$	$7.9.10^6$	230
2	$3,722.10^4$	$3,738.10^4$	$3,73.10^4$	$8.2.10^6$	323
3	$3,738.10^4$	$3,754.10^4$	$3,74.10^4$	$8,4.10^6$	412
4	$3,754.10^4$	$3,77.10^4$	$3,75.10^4$	$8,6.10^6$	412

A Figura (5.24) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.18) e (5.19).

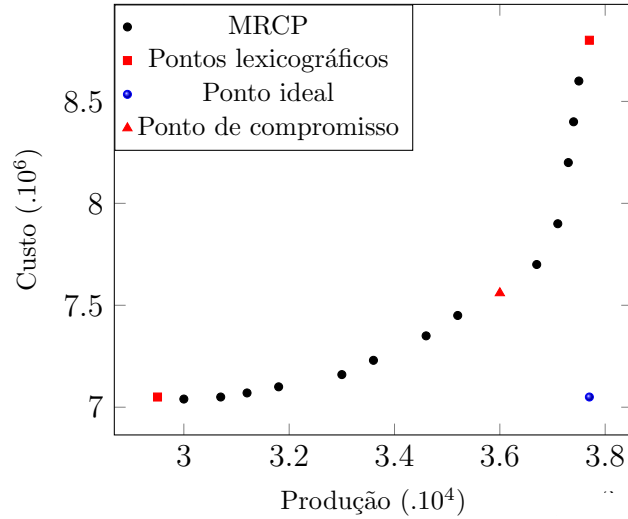


Figura 5.24: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.18) e (5.19).

5.4.4 Resultados da terceira colheita na instância com 30 talhões

Na Tabela (5.20) são apresentado os resultados obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.10) no terceiro período de colheita da instância com 30 talhões.

Tabela 5.20 - Resultado para a terceira colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.

k	$C_{CCT_k(min)}^3$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^3$ (R\$)	$C_{CCT_k}^3$ (R\$)	$P_{SF_k}^3$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	7,002.10 ⁶	7,17.10 ⁶	7,16.10 ⁶	3,2.10 ⁴	122
1	7,17.10 ⁶	7,34.10 ⁶	7,33.10 ⁶	3,5.10 ⁴	120
2	7,34.10 ⁶	7,5.10 ⁶	7,49.10 ⁶	3,56.10 ⁴	150
3	7,5.10 ⁶	7,67.10 ⁶	7,66.10 ⁶	3,7.10 ⁴	90
4	7,67.10 ⁶	7,84.10 ⁶	7,84.10 ⁶	3,71.10 ⁴	100
5	7,84.10 ⁶	8.10 ⁶	8,01.10 ⁶	3,72.10 ⁴	120
6	8.10 ⁶	8,17.10 ⁶	8,16.10 ⁶	3,74.10 ⁴	100
7	8,17.10 ⁶	8,34.10 ⁶	8,33.10 ⁶	3,75.10 ⁴	100
8	8,34.10 ⁶	8,5.10 ⁶	8,49.10 ⁶	3,764.10 ⁴	220
9	8,5.10 ⁶	8,67.10 ⁶	8,66.10 ⁶	3,768.10 ⁴	115

Nesta colheita, o ponto ideal tem coordenadas $C_{CCT(min)}^3 = \text{R\$}7.002.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^3 = 37700$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.25) pelo círculo azul. O ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 1$ (representado na Figura (5.25) pelo triângulo vermelho) de custo de $C_{CCT1}^3 = \text{R\$}7.330.000,00$ e produção $P_{SF1}^3 = 35000$ toneladas de sacarose e fibra provenientes da cana-de-açúcar e cana-energia.

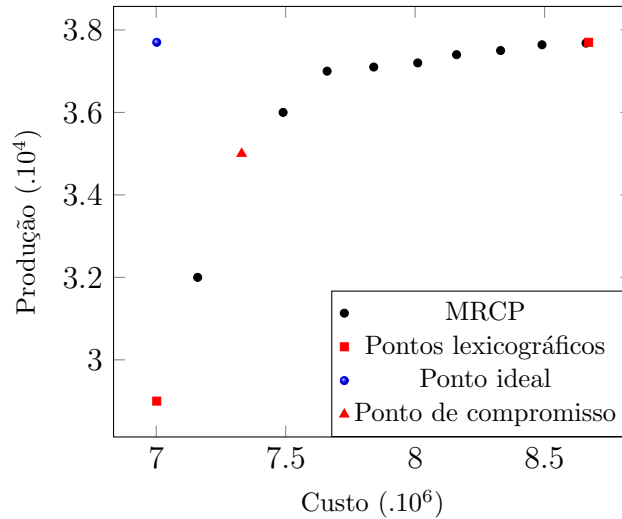


Figura 5.25: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.20).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.25), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 0$ de extremos $[\text{R\$}7.002.000,00, \text{R\$}7.170.000,00]$ relativo ao custo de cultivo, colheita e transporte. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi

dividido em 5 partições, determinando a amplitude $C\Delta_0^3 = \text{R\$}33.600,00$. Na Tabela (5.21) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.21 - Resultados da terceira colheita nas partições com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões

q	$C_{CCT_0q}^3$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^3$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^3$ (R\$)	$P_{SF_0q}^3$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	7,002.10 ⁶	7,036.10 ⁶	7,03.10 ⁶	3.10 ⁴	345
1	7,036.10 ⁶	7,069.10 ⁶	7,068.10 ⁶	3,2.10 ⁴	540
2	7,069.10 ⁶	7,103.10 ⁶	7,102.10 ⁶	3,31.10 ⁴	380
3	7,103.10 ⁶	7,136.10 ⁶	7,135.10 ⁶	3,38.10 ⁴	620
4	7,136.10 ⁶	7,17.10 ⁶	7,16.10 ⁶	3,45.10 ⁴	323

A Figura (5.26) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.20) e (5.21).

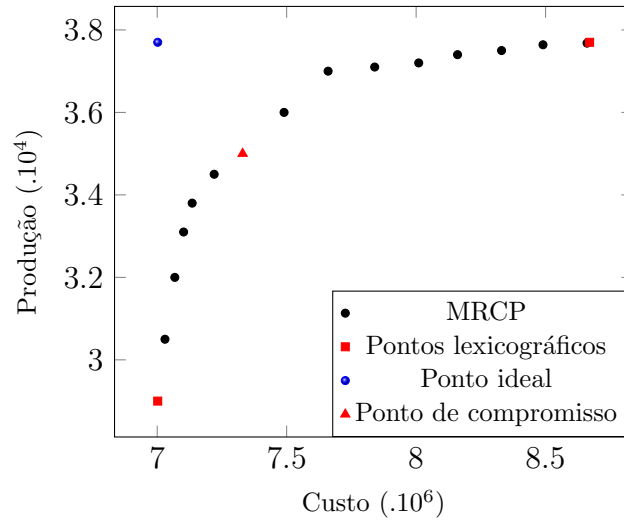


Figura 5.26: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.20) e (5.21).

Na tabela (5.22) são apresentados os resultados obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na terceira colheita da instância com 30 talhões.

Tabela 5.22 - Resultado para a terceira colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões.

k	$P_{SF_k(min)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k}^3$ ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^3 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	2,9.10 ⁴	2,99.10 ⁴	2,96.10 ⁴	7.10 ⁶	81
1	2,99.10 ⁴	3,07.10 ⁴	3,02.10 ⁴	7,01.10 ⁶	120
2	3,07.10 ⁴	3,16.10 ⁴	3,1.10 ⁴	7,06.10 ⁶	150
3	3,16.10 ⁴	3,25.10 ⁴	3,17.10 ⁴	7,09.10 ⁶	80
4	3,25.10 ⁴	3,33.10 ⁴	3,27.10 ⁴	7,18.10 ⁶	80
5	3,33.10 ⁴	3,42.10 ⁴	3,35.10 ⁴	7,27.10 ⁶	120
6	3,42.10 ⁴	3,51.10 ⁴	3,43.10 ⁴	7,36.10 ⁶	100
7	3,51.10 ⁴	3,6.10 ⁴	3,52.10 ⁴	7,44.10 ⁶	120
8	3,6.10 ⁴	3,68.10 ⁴	3,58.10 ⁴	7,53.10 ⁶	220
9	3,68.10 ⁴	3,77.10 ⁴	3,7.10 ⁴	7,95.10 ⁶	110

Nesta implementação, obteve-se como ponto de compromisso (coordenadas do ponto ideal: custo $C_{CCT(min)}^3 = \text{R}\$7.002.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^3 = 37700$ toneladas de sacarose e fibra, indicada pelo círculo azul na Figura (5.27)) a do subintervalo $k = 8$ (representado na Figura (5.27) pelo triângulo vermelho), de custo $C_{CCT8}^3 = \text{R}\$7.650.000,00$ e produção $P_{SF8}^3 = 36800$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

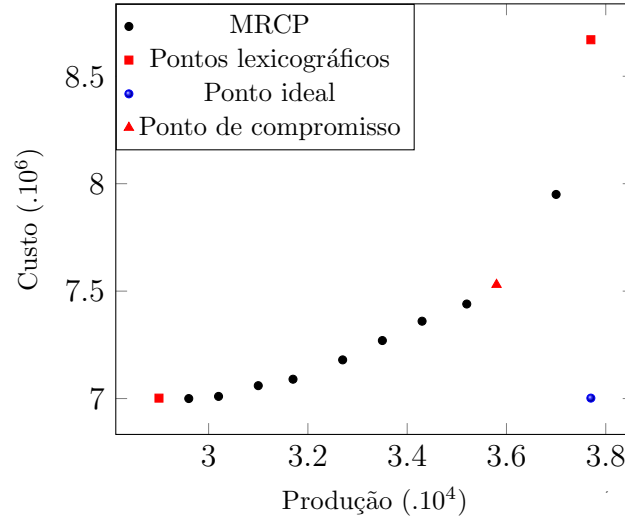


Figura 5.27: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.22).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.27), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 9$ de extremos $[36800, 37700]$ relativo à produção de sacarose e fibra. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando

a amplitude $P\Delta_9^3 = 180$. Na Tabela (5.23) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.23 - Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na terceira colheita da instância com 30 talhões.

q	$P_{SF9q(min)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^3 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^3 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$3,68.10^4$	$3,698.10^4$	$3,685.10^4$	$7,6.10^6$	376
1	$3,698.10^4$	$3,716.10^4$	$3,7.10^4$	$7.9.10^6$	230
2	$3,716.10^4$	$3,734.10^4$	$3,72.10^4$	$8.2.10^6$	323
3	$3,734.10^4$	$3,752.10^4$	$3,74.10^4$	$8,4.10^6$	412
4	$3,752.10^4$	$3,77.10^4$	$3,76.10^4$	$8,6.10^6$	412

A Figura (5.28) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.22) e (5.23).

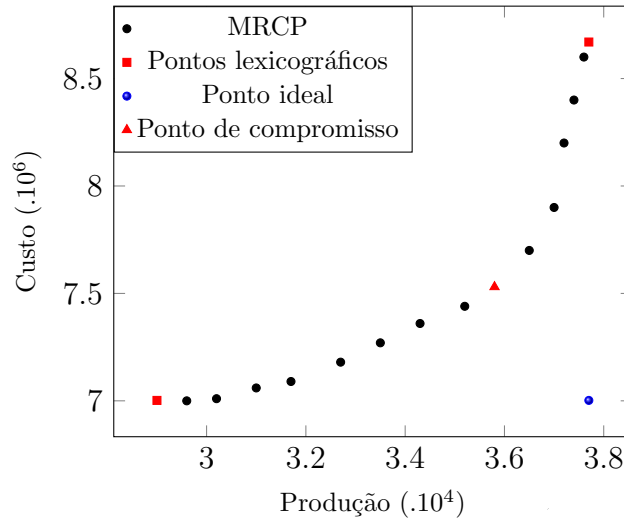


Figura 5.28: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.22) e (5.23).

5.4.5 Resultados da quarta colheita na instância com 30 talhões

A Tabela (5.24) mostra os resultados obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na quarta colheita da instância com 30 talhões.

Tabela 5.24 - Resultado para a quarta colheita com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.

k	$C_{CCT_k(min)}^4$ (R\$)	$C_{CCT_k(min)}^4$ (R\$)	$C_{CCT_k}^4$ (R\$)	$P_{SF_k}^4$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	6,98.10 ⁶	7,14.10 ⁶	7,14.10 ⁶	3,4.10 ⁴	81
1	7,14.10 ⁶	7,3.10 ⁶	7,25.10 ⁶	3,6.10 ⁴	320
2	7,3.10 ⁶	7,46.10 ⁶	7,45.10 ⁶	3,68.10 ⁴	150
3	7,46.10 ⁶	7,62.10 ⁶	7,60.10 ⁶	3,7.10 ⁴	100
4	7,62.10 ⁶	7,78.10 ⁶	7,77.10 ⁶	3,73.10 ⁴	100
5	7,78.10 ⁶	7,94.10 ⁶	7,93.10 ⁶	3,76.10 ⁴	120
6	7,94.10 ⁶	8,1.10 ⁶	8,09.10 ⁶	3,765.10 ⁴	112
7	8,1.10 ⁶	8,26.10 ⁶	8,25.10 ⁶	3,78.10 ⁴	108
8	8,26.10 ⁶	8,42.10 ⁶	8,41.10 ⁶	3,787.10 ⁴	220
9	8,42.10 ⁶	8,58.10 ⁶	8,56.10 ⁶	3,79.10 ⁴	200

Na quarta colheita da instância com 30 talhões, o ponto ideal tem coordenadas com custo $C_{CCT(min)}^4 = \text{R\$}6.980.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^4 = 38000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.29) pelo círculo azul. Nesta curva Pareto-Ótimo, o ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 1$ (representada pelo triângulo vermelho na Figura (5.29)) e tem coordenadas com custo $C_{CCT_1}^4 = \text{R\$}7.250.000,00$ e produção $P_{SF_1}^4 = 36500$ toneladas de sacarose e fibra obtidas a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

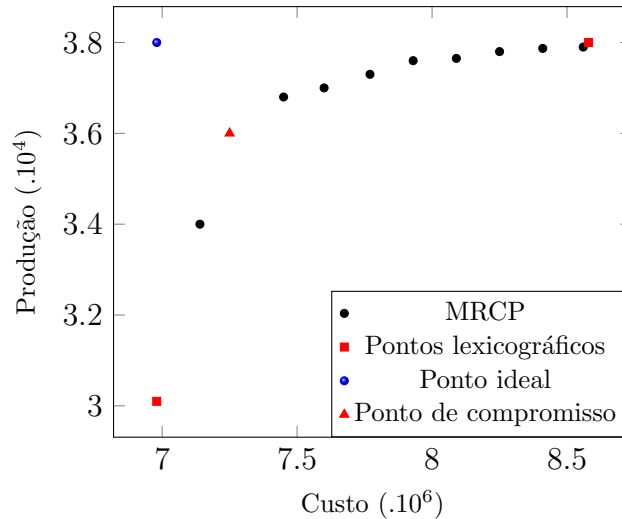


Figura 5.29: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.24).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.29), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 0$ de extremos $[\text{R\$}6.980.000,00, \text{R\$}7.140.000,00]$ relativo ao custo

de cultivo, colheita e transporte. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $C\Delta_0^4 = \text{R\$}32.000,00$. Na Tabela (5.25) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.25 - Resultados da quarta colheita nas partições com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões

q	$C_{CCT_0q(min)}^4$ (R\$)	$C_{CCT_0q(max)}^4$ (R\$)	$C_{CCT_0q}^4$ (R\$)	$P_{SF_0q}^4$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	$6,98.10^6$	$7,012.10^6$	$7,008.10^6$	$3,08^4$	545
1	$7,012.10^6$	$7,044.10^6$	$7,023.10^6$	$3,2.10^4$	654
2	$7,044.10^6$	$7,076.10^6$	$7,056.10^6$	$3,31.10^4$	482
3	$7,076.10^6$	$7,108.10^6$	$7,105.10^6$	$3,38.10^4$	292
4	$7,108.10^6$	$7,14.10^6$	$7,12.10^6$	$3,45.10^4$	452

A Figura (5.30) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.24) e (5.25).

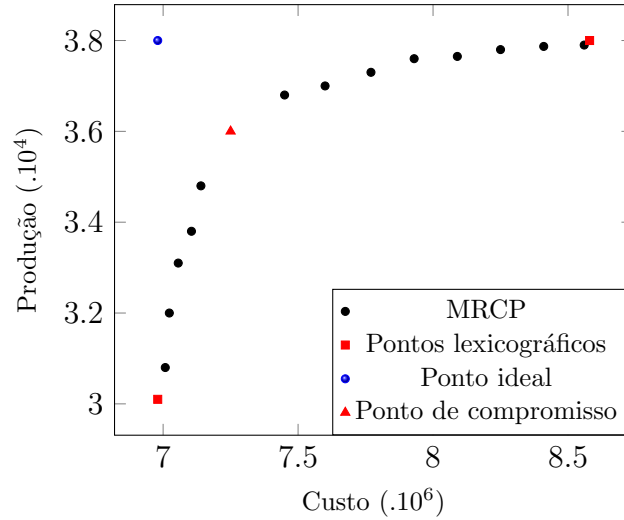


Figura 5.30: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.24) e (5.25).

Na tabela (5.26) são apresentados os resultados obtidos pela resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na quarta colheita da instância com 30 talhões.

Tabela 5.26 - Resultado para a quarta colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões.

k	$P_{SF_k(min)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k}^4$ ($t.ha^{-1}$)	$C_{CCT_k}^4$ (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	3,01.10 ⁴	3,09.10 ⁴	3,03.10 ⁴	6,98.10 ⁶	81
1	03,09.10 ⁴	3,17.10 ⁴	3,1.10 ⁴	6,99.10 ⁶	120
2	3,17.10 ⁴	3,25.10 ⁴	3,19.10 ⁴	7,03.10 ⁶	150
3	3,25.10 ⁴	3,33.10 ⁴	3,27.10 ⁴	7,07.10 ⁶	80
4	3,33.10 ⁴	3,41.10 ⁴	3,34.10 ⁴	7,19.10 ⁶	80
5	3,41.10 ⁴	3,49.10 ⁴	3,42.10 ⁴	7,25.10 ⁶	120
6	3,49.10 ⁴	3,57.10 ⁴	3,48.10 ⁴	7,4.10 ⁶	100
7	3,57.10 ⁴	3,65.10 ⁴	3,58.10 ⁴	7,48.10 ⁶	120
8	3,65.10 ⁴	7,3.10 ⁴	3,66.10 ⁴	7,62.10 ⁶	220
9	3,73.10 ⁴	3,8.10 ⁴	3,78.10 ⁴	7,92.10 ⁶	110

Nesta implementação, o ponto de compromisso (coordenadas do ponto ideal: custo de cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^4 = \text{R\$}6.980.000,00$ com produção $P_{SF(max)}^4 = 38000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.31) pelo círculo azul) pertencente ao subintervalo $k = 8$ (representada na Figura (5.31) pelo triângulo vermelho) com $C_{4CCT8}^4 = \text{R\$}7.620.000,00$ de custo e produção $P_{SF8}^4 = 36600$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

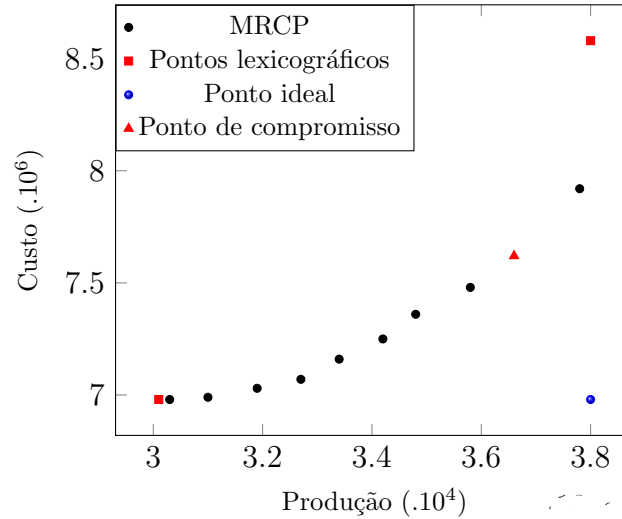


Figura 5.31: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.26).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.31), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 9$ de extremos $[37300, 38000]$ relativo à produção de sacarose e fibra. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando

a amplitude $P\Delta_9^4 = 140$. Na Tabela (5.27) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.27 - Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na quarta colheita da instância com 30 talhões.

q	$P_{SF9q(min)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^4 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^4 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$3,73.10^4$	$3,744.10^4$	$3,74.10^4$	$7,64.10^6$	376
1	$3,744.10^4$	$3,758.10^4$	$3,75.10^4$	$7.75.10^6$	230
2	$3,758.10^4$	$3,772.10^4$	$3,76.10^4$	$7.9.10^6$	323
3	$3,772.10^4$	$3,786.10^4$	$3,78.10^4$	$8.1.10^6$	412
4	$3,786.10^4$	$3,8.10^4$	$3,788.10^4$	$8,3.10^6$	412

A Figura (5.32) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.26) e (5.27).

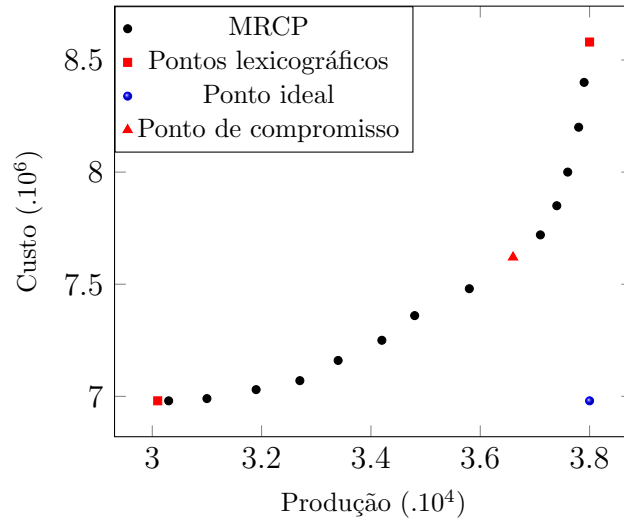


Figura 5.32: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.26) e (5.27).

5.4.6 Resultados considerando as quatro colheitas na instância com 30 talhões.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos considerando as quatro colheitas simultaneamente, ou seja, a produção de sacarose e fibra e o custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte são obtidos com o somatório dos quatro períodos de colheita. Assim, deseja-se determinar variedades de cana-de-açúcar e cana-energia capazes de minimizar o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte e gerar a máxima produção de sacarose e fibra em quatro cortes.

A Tabela (5.28) mostra o resultado de custo e produção em cada subintervalo, obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.10), considerando as quatro colheitas.

Tabela 5.28 - Resultados em cada subintervalo considerando as quatro colheitas obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões.

k	$C_{CCT_k(min)}$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}$ (R\$)	C_{CCT_k} (R\$)	P_{SFk} ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	28,15.10 ⁶	28,84.10 ⁶	28,76.10 ⁶	1,27.10 ⁵	121
1	28,84.10 ⁶	29,52.10 ⁶	29,55.10 ⁶	1,42.10 ⁵	320
2	29,52.10 ⁶	30,21.10 ⁶	30,2.10 ⁶	1,46.10 ⁵	600
3	30,21.10 ⁶	30,7.10 ⁶	30,8.10 ⁶	1,467.10 ⁵	380
4	30,7.10 ⁶	31,58.10 ⁶	31,56.10 ⁶	1,48.10 ⁵	100
5	31,58.10 ⁶	32,3.10 ⁶	32,27.10 ⁶	1,49.10 ⁵	320
6	32,3.10 ⁶	32,95.10 ⁶	32,94.10 ⁶	1,494.10 ⁵	112
7	32,95.10 ⁶	33,64.10 ⁶	33,6.10 ⁶	1,5.10 ⁵	108
8	33,64.10 ⁶	34,32.10 ⁶	34,25.10 ⁶	1,506.10 ⁵	120
9	34,32.10 ⁶	35,01.10 ⁶	34,95.10 ⁶	1,51.10 ⁵	200

Considerando as quatro colheitas, o ponto ideal tem coordenadas com custo de plantio, cultivo, colheitas e transporte $C_{CCT(min)} = \text{R\$}28.150.000,00$ de custo e produção $P_{SF(max)} = 151000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.33) pelo círculo azul. Nesta curva Pareto-Ótimo, o ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 1$ (representada na Figura (5.33) pelo triângulo vermelho) que tem coordenadas $C_{CCT1} = \text{R\$}29.550.000,00$ e $P_{SF1} = 142000$ toneladas de produção de sacarose e fibra obtidas a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

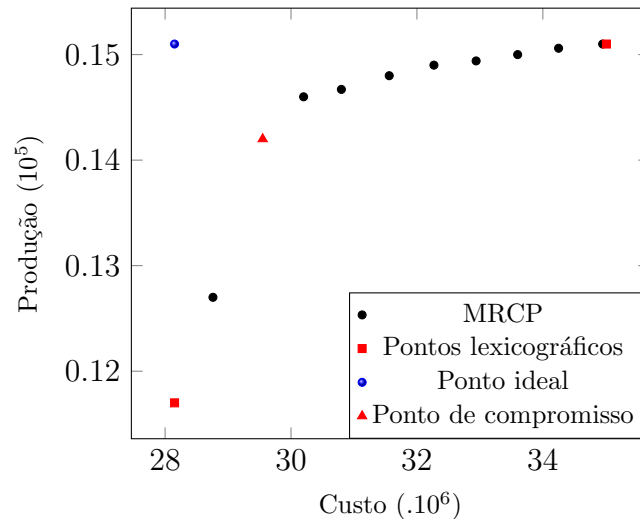


Figura 5.33: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.28).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.33), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 0$ de extremos $[\text{R\$}28.150.000,00, \text{R\$}28.840.000,00]$ relativo ao custo

de cultivo, colheita e transporte. Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $C\Delta_0 = \text{R\$}138.000,00$. Na Tabela (5.29) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.29 - Resultados considerando as quatro colheitas nas partições com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 30 talhões

q	$C_{CCT_0q(min)}$ (R\$)	$C_{CCT_0q(max)}$ (R\$)	C_{CCT_0q} (R\$)	P_{SF_0q} ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	28,15.10 ⁶	28,288.10 ⁶	28,13.10 ⁶	1,21.10 ⁵	545
1	28,288.10 ⁶	28,426.10 ⁶	28,423.10 ⁶	1,256.10 ⁵	654
2	28,426.10 ⁶	28,564.10 ⁶	28,55.10 ⁶	1,298.10 ⁵	482
3	28,564.10 ⁶	28,702.10 ⁶	28,7.10 ⁶	1,34.10 ⁵	292
4	28,702.10 ⁶	28,84.10 ⁶	28,8.10 ⁶	1,378.10 ⁵	452

A Figura (5.34) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.28) e (5.29).

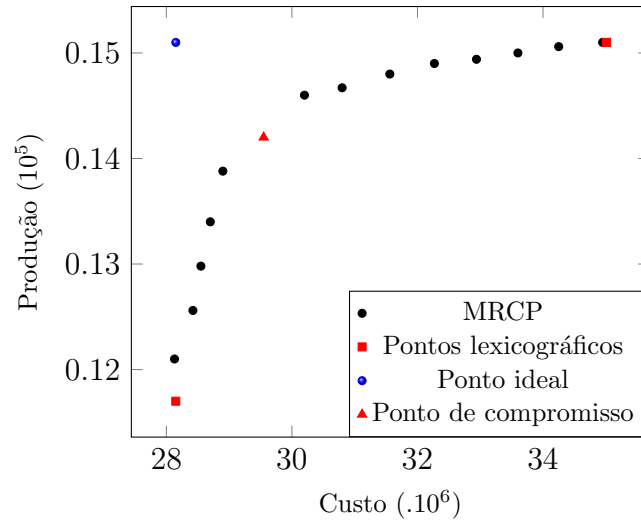


Figura 5.34: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.28) e (5.29).

Na Tabela (5.30) são apresentados os resultados em cada subintervalo por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) para o custo de plantio, cultivo, colheita e transporte e produção de sacarose e fibra considerando as quatro colheitas da instância com 30 talhões.

Tabela 5.30 - Resultados em cada subintervalo considerando as quatro colheita obtidos por meio da resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 30 talhões.

k	$P_{SF_k(min)}$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFk} ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk} (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	$1,17.10^5$	$1,204.10^5$	$1,18.10^5$	$28,16.10^6$	432
1	$1,204.10^5$	$1,238.10^5$	$1,207.10^5$	$28,2.10^6$	120
2	$1,238.10^5$	$1,272.10^5$	$1,24.10^5$	$28,37.10^6$	150
3	$1,272.10^5$	$1,306.10^5$	$1,27.10^5$	$28,5.10^6$	80
4	$1,306.10^5$	$1,34.10^5$	$1,31.10^5$	29.10^6	80
5	$1,34.10^5$	$1,374.10^5$	$1,34.10^5$	$29,24.10^6$	120
6	$1,374.10^5$	$1,408.10^5$	$1,38.10^5$	$29,63.10^6$	100
7	$1,408.10^5$	$1,442.10^5$	$1,41.10^5$	$30,18.10^6$	120
8	$1,442.10^5$	$1,476.10^5$	$1,45.10^5$	$30,79.10^6$	220
9	$1,476.10^5$	$1,51.10^5$	$1,48.10^5$	$32,22.10^6$	110

Assim, nesta implementação, o ponto ideal tem valor de custo $C_{CCT(min)} = R\$28.150.000,00$ e produção de $P_{SF(max)} = 151000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.35) pelo círculo azul e o ponto de compromisso pertencente ao subintervalo $k = 8$ (representado na Figura (5.35) pelo triângulo vermelho), com custo operacional de $C_{CCT8} = R\$30.790.000,00$ e produção $P_{SF8} = 145000$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia para quatro colheitas.

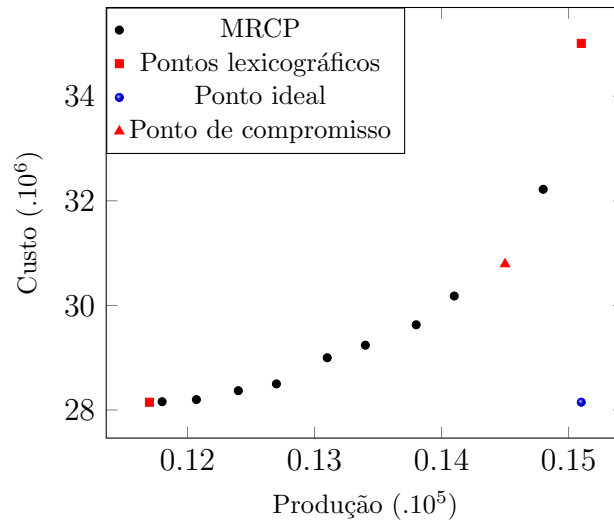


Figura 5.35: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.30).

Na curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.35), a maior distância entre pontos eficientes ocorre no subintervalo $k = 9$ de extremos $[147600, 151000]$ relativo à produção de sacarose e fibra.

Para determinar novos pontos eficientes, o subintervalo foi dividido em 5 partições, determinando a amplitude $P\Delta_9 = 680$. Na Tabela (5.31) são apresentados os resultados para cada nova partição.

Tabela 5.31 - Resultados em cada partição com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) considerado todas as colheitas da instância com 30 talhões.

q	$P_{SF9q(min)}$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q} ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q} ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$1,476.10^5$	$1,483.10^5$	$1,48.10^5$	31.10^6	446
1	$1,483.10^5$	$1,49.10^5$	$1,485.10^5$	$32,3.10^6$	560
2	$1,49.10^5$	$1,496.10^5$	$1,493.10^5$	$33,4.10^6$	623
3	$1,496.10^5$	$1,503.10^5$	$1,5.10^5$	$34,2.10^6$	712
4	$1,503.10^5$	$1,51.10^4$	$1,505.10^5$	$34,8.10^6$	712

A Figura (5.36) representa a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.30) e (5.31).

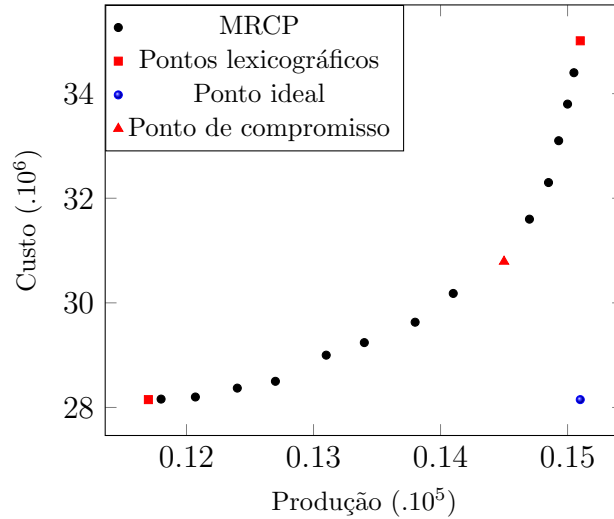


Figura 5.36: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.30) e (5.31).

5.4.7 Variedades selecionadas, meses de plantio e meses de colheita para cada período de colheita da instância com 30 talhões no ponto de compromisso

Para o ponto de compromisso de cada período de colheita, determinados por meio da resolução dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11), verificou-se a porcentagem de talhões plantados para cada variedade de cana-de-açúcar e cana-energia selecionada, a porcentagem de talhões que receberam o plantio nos meses destinado ao plantio e a porcentagem de talhões que receberam a colheita nos meses de colheita.

A Figura (5.37) apresenta a porcentagem talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-de-açúcar e cana-energia selecionada no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.10).

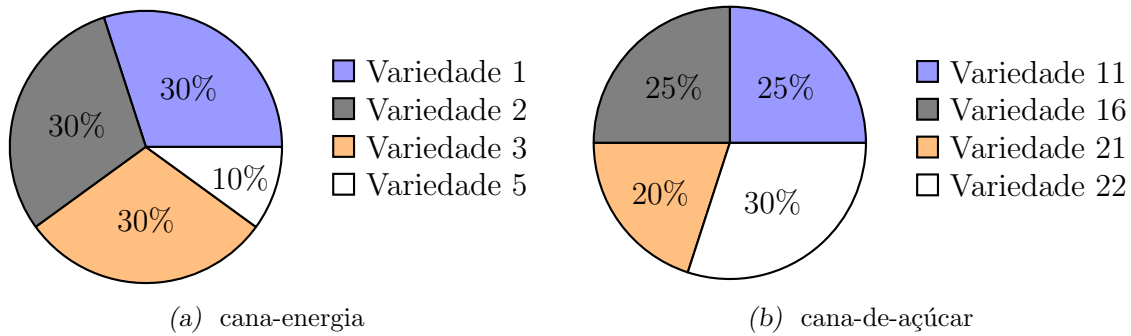


Figura 5.37: Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 30 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.10).

A seguir, a Figura (5.38) apresenta a porcentagem talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-de-açúcar e cana-energia selecionada no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.11).

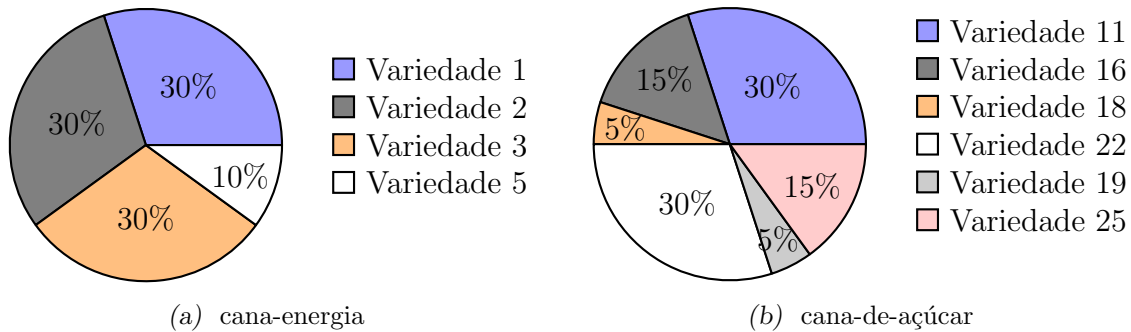


Figura 5.38: Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 30 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.11).

A Figura (5.39) mostra a porcentagem de talhões que receberam o plantio em cada mês destinado ao plantio no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).

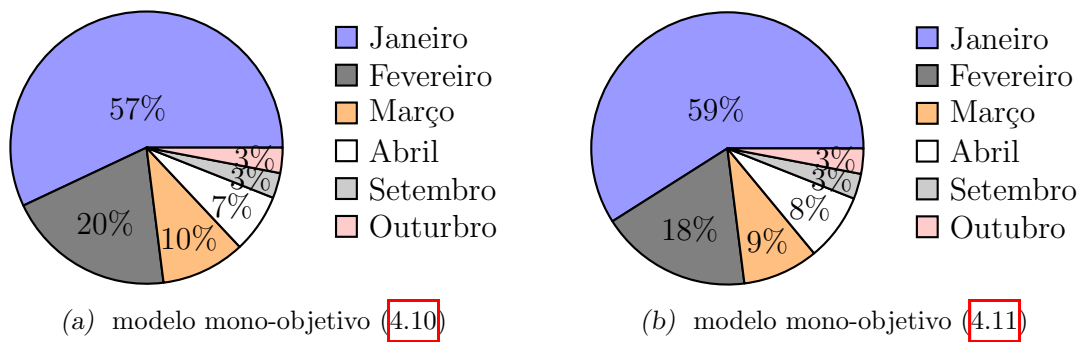


Figura 5.39: Percentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar nos meses destinado ao plantio no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).

Pela Figura (5.39) é possível verificar que grande parte dos talhões foram destinados à “cana de ano e meio” por receberem o plantio nos meses de janeiro a março, fato que pode ser explicado pela maior produtividade da cana.

A Figura (5.40) mostra a percentagem de talhões colhidos nos meses do primeiro período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

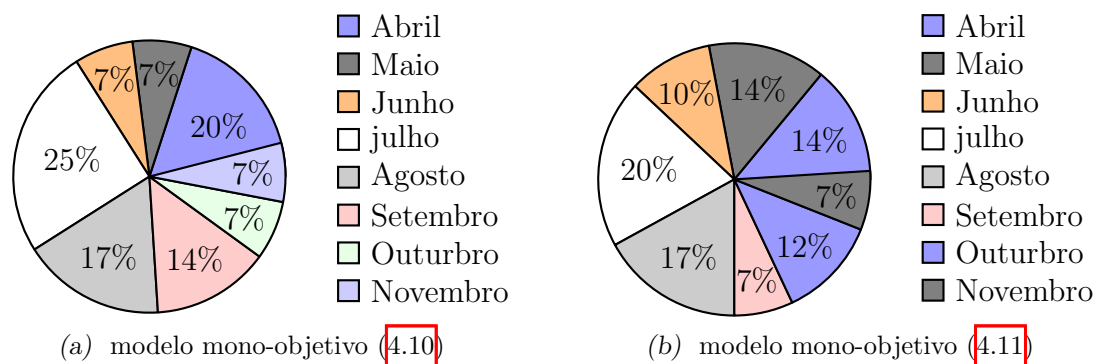


Figura 5.40: Percentagem de talhões colhidos nos meses do primeiro período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Nota-se, pela Figura (5.40) que em torno de 50% dos talhões foram colhidos entre os meses de junho a agosto, garantindo um desvio mínimo ou nulo do pico de maturação da cana-de-açúcar e cana-energia. Na primeira colheita, considerado também o custo de plantio da cana-de-açúcar e cana-energia, o ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.10) teve custo de R\$7.520.000,00, com produção de 18320 toneladas de sacarose e 14680 toneladas de fibra e no ponto de compromisso do modelo-monoobjetivo (4.11) obteve-se um custo operacional de R\$7.800.000,00, com produção de 20120 toneladas de sacarose e 15680 toneladas de fibra.

A Figura (5.41) mostra a percentagem de talhões colhidos nos meses do segundo período

colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

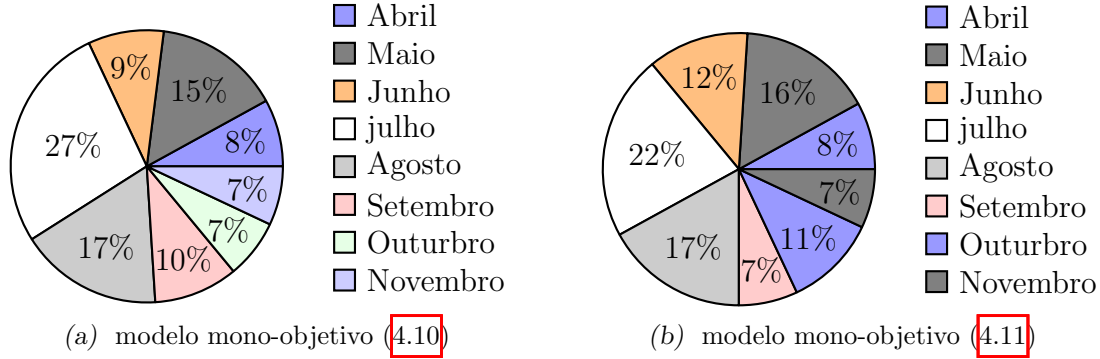


Figura 5.41: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do segundo período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Para a segunda colheita, o ponto de compromisso tem custo de cultivo, colheita e transporte de R\$7.340.000,00, com produção de 17160 toneladas de sacarose e 16840 toneladas de fibra, na resolução do modelo mono-objetivo (4.10) e com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11), no ponto de compromisso, obteve-se custo de R\$7.710.000,00, com produção de 19480 toneladas de sacarose e 16220 toneladas de fibra.

Na Figura (5.42) são apresentados as porcentagens dos talhões colhidos nos meses do terceiro período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

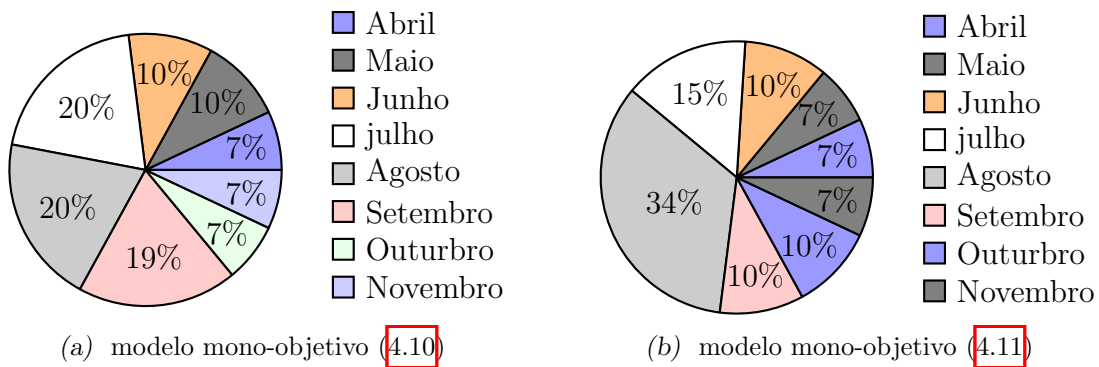


Figura 5.42: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do terceiro período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Na terceira colheita, para o ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.10), o custo de cultivo, colheita e transporte é de R\$7.330.000,00, com produção de 19120 toneladas de sacarose e 15880 toneladas de fibra. No ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.11), o custo

foi de R\$7.650.000,00, com produção de 20430 toneladas de sacarose e 15770 toneladas de fibra.

A Figura (5.43) mostra a porcentagem de talhões colhidos nos meses do quarto período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

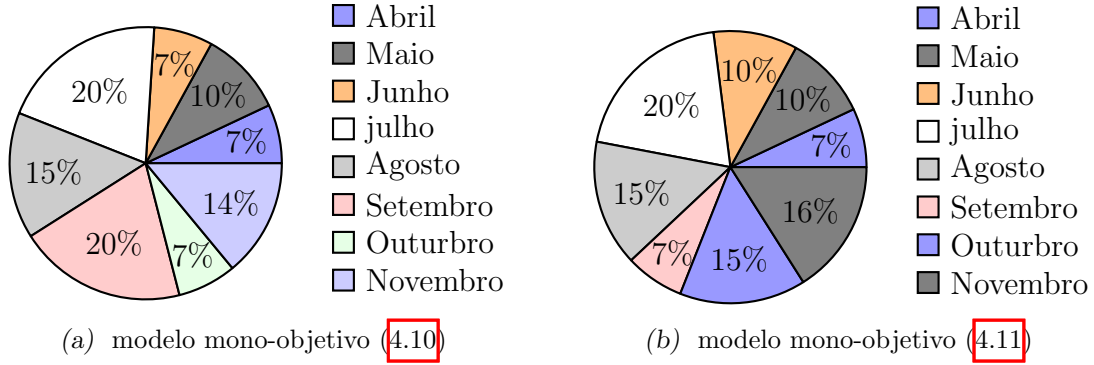


Figura 5.43: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do quarto período colheita na instância com 30 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Nesta colheita, na implementação do modelo mono-objetivo (4.10), determinou-se ponto de compromisso com produção de 20620 toneladas de sacarose e 15880 toneladas de fibra, a partir das variedades de cana-de-açúcar e cana-energia com custo de cultivo, colheita e transporte de R\$7.250.000,00. No ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.11), obteve-se 19960 toneladas de sacarose e 16640 toneladas de fibra com custo de R\$7.620.000,00.

5.4.8 Pontos lexicográficos para cada período de colheita na instância com 65 talhões

Resolvendo os modelos (4.2) e (4.3) obtêm-se os pontos lexicográficos para cada colheita na instância com 65 talhões por meio do modelo multiobjetivo (3.3). Dividindo os intervalos do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte e da produção de sacarose e fibra de cada colheita em 10 subintervalos, determina-se as amplitudes para o custo e para a produção. Na Tabela (5.32) são apresentados os pontos lexicográficos e as amplitudes para cada colheita.

Tabela 5.32 - Pontos lexicográficos e amplitudes para cada colheita da instância com 65 talhões

c	$C_{CCT(min)}^c$ (R\$)	$C_{CCT(max)}^c$ (R\$)	$P_{SF(min)}^c$ (t.ha ⁻¹)	$P_{SF(max)}^c$ (t.ha ⁻¹)	$C\Delta_c$ (R\$)	$P\Delta_c$ (t.ha ⁻¹)
1	14,47.10 ⁶	18,96.10 ⁶	5,1.10 ⁴	7,4.10 ⁴	4,49.10 ⁵	2,3.10 ³
2	13,95.10 ⁶	18,2.10 ⁶	4,9.10 ⁴	7,2.10 ⁴	4,25.10 ⁵	2,3.10 ³
3	13,49.10 ⁶	17,5.10 ⁶	4,9.10 ⁴	7.10 ⁴	4,01.10 ⁵	2,1.10 ³
4	13,07.10 ⁶	16,9.10 ⁶	4,8.10 ⁴	6,9.10 ⁴	3,83.10 ⁵	2,1.10 ³
Total	54,99.10 ⁶	71,57.10 ⁶	1,97.10 ⁵	2,85.10 ⁵	1,658.10 ⁶	8,8.10 ³

Assim, com os resultados da Tabela (5.32) é possível obter pontos eficientes para cada colheita por meio do modelo multiobjetivo (3.3) transformado pelo MRCP nos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).

5.4.9 Resultados do plantio e primeira colheita na instância com 65 talhões

A Tabela (5.33) mostra os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de plantio, cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar e cana-energia para o plantio e primeira colheita na instância com 65 talhões.

Tabela 5.33 - Resultados para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^1$ (R\$)	$C_{CCT_k}^1$ (R\$)	$P_{SF_k}^1$ ($t.ha^{-1}$)	Tempo de resolução (s)
0	14,47.10 ⁶	14,92.10 ⁶	14,89.10 ⁶	5,7.10 ⁴	81
1	14,92.10 ⁶	15,37.10 ⁶	15,23.10 ⁶	6,2.10 ⁴	300
2	15,37.10 ⁶	15,82.10 ⁶	15,5.10 ⁶	6,8.10 ⁴	150
3	15,82.10 ⁶	16,26.10 ⁶	16,2.10 ⁶	7,14.10 ⁴	200
4	16,26.10 ⁶	16,72.10 ⁶	16,68.10 ⁶	7,2.10 ⁴	80
5	16,72.10 ⁶	17,16.10 ⁶	17,15.10 ⁶	7,25.10 ⁴	120
6	17,16.10 ⁶	17,61.10 ⁶	17,59.10 ⁶	7,27.10 ⁴	65
7	17,61.10 ⁶	18,06.10 ⁶	18,03.10 ⁶	7,35.10 ⁴	80
8	18,06.10 ⁶	18,51.10 ⁶	18,46.10 ⁶	7,37.10 ⁴	220
9	18,51.10 ⁶	18,96.10 ⁶	18,91.10 ⁶	7,39.10 ⁴	320

O ponto ideal da primeira colheita tem coordenadas com custo $C_{CCT(min)}^1 = R\$14.470.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^1 = 74000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.44) pelo círculo azul. O ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 2$, indicado pelo triângulo vermelho na Figura (5.44), de custo $C_{CCT2}^1 = R\$15.500.000,00$ e produção $P_{SF2}^1 = 68000$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

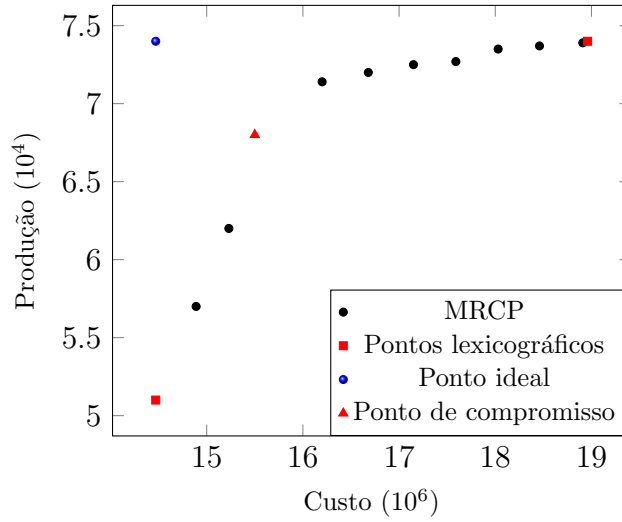


Figura 5.44: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.33).

A Tabela (5.34) mostra os resultados obtidos pela resolução do modelo mono-objetivo (4.11) no plantio e primeira colheita da instância com 65 talhões.

Tabela 5.34 - Resultado para o plantio e primeira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

k	$P_{SF_k(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFk}^1 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^1 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	5, 1.10 ⁴	5, 33.10 ⁴	5, 2.10 ⁴	14, 49.10 ⁶	81
1	5, 33.10 ⁴	5, 56.10 ⁴	5, 34.10 ⁴	14, 56.10 ⁶	300
2	5, 56.10 ⁴	5, 79.10 ⁴	5, 55.10 ⁴	14, 64.10 ⁶	150
3	5, 79.10 ⁴	6, 02.10 ⁴	5, 8.10 ⁴	14, 86.10 ⁶	200
4	6, 02.10 ⁴	6, 25.10 ⁴	6, 1.10 ⁴	14, 91.10 ⁶	80
5	6, 25.10 ⁴	6, 48.10 ⁴	6, 27.10 ⁴	15, 2.10 ⁶	120
6	6, 48.10 ⁴	6, 71.10 ⁴	6, 49.10 ⁴	15, 48.10 ⁶	65
7	6, 71.10 ⁴	6, 94.10 ⁴	6, 72.10 ⁴	15, 6.10 ⁶	80
8	6, 94.10 ⁴	7, 17.10 ⁴	6, 95.10 ⁴	16, 01.10 ⁶	220
9	7, 17.10 ⁴	7, 4.10 ⁴	7, 2.10 ⁴	16, 82.10 ⁶	320

Nesta implementação, foi determinado o ponto de compromisso (coordenadas ponto ideal: custo $C_{CCT(min)}^1 = R\$14.470.000,00$ e $P_{SF(max)}^1 = 74000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.45) pelo círculo azul) no subintervalo $k = 8$ (representado na Figura (5.45) pelo triângulo vermelho), de custo $C_{CCT8}^1 = R\$16.010.000,00$ e produção $P_{SF8}^1 = 69500$ toneladas de sacarose e fibra da cana-de-açúcar e cana-energia.

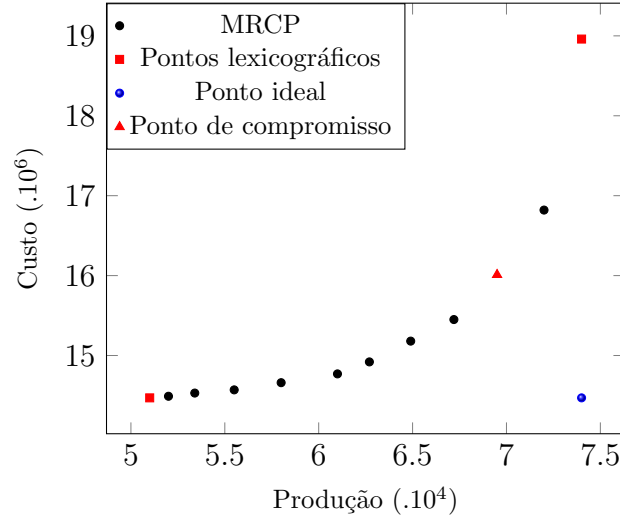


Figura 5.45: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.34).

Na Curva Pareto-Ótimo apresentada na Figura (5.45), a maior distância entre dois pontos eficientes ocorreu no subintervalo em que $k = 9$, definido por $[71700, 74000]$ relativos à produção de sacarose e fibra. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 9$ foi dividido em 5 novas partições. Assim, dividindo o intervalo da produção de sacarose e fibra em 5 partições, obtém-se a amplitude da produção de sacarose e fibra, ou seja, $P\Delta_9^1 = 460$. A Tabela (5.35) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.35 - Resultados do plantio e primeira colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

q	$P_{SF9q(min)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^1$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^1 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^1 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	7, 17.10 ⁴	7, 22.10 ⁴	7, 18.10 ⁴	16, 82.10 ⁶	422
1	7, 22.10 ⁴	7, 26.10 ⁴	7, 24.10 ⁴	16, 88.10 ⁶	386
2	7, 26.10 ⁴	7, 31.10 ⁴	7, 27.10 ⁴	17, 23.10 ⁶	233
3	7, 31.10 ⁴	7, 35.10 ⁴	7, 32.10 ⁴	17, 45.10 ⁶	243
4	7, 35.10 ⁴	7, 4.10 ⁴	7, 36.10 ⁴	17, 95.10 ⁶	312

A Figura (5.46) apresenta a curva Pareto-Ótimo com os pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.34) e (5.35).

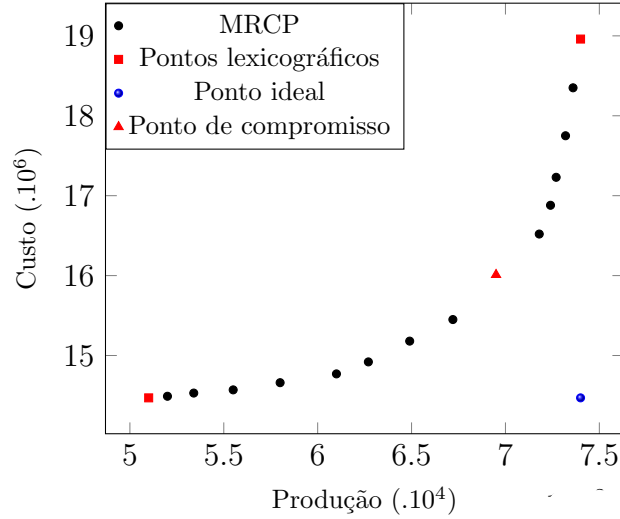


Figura 5.46: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.34) e (5.35).

5.4.10 Resultados da segunda colheita na instância com 65 talhões.

A Tabela (5.36) mostra os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar e cana-energia para a segunda colheita na instância com 65 talhões.

Tabela 5.36 - Resultado para segunda colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^2$ (R\$)	$C_{CCT_k}^2$ (R\$)	$P_{SF_k}^2$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	13,95.10 ⁶	14,37.10 ⁶	14,35.10 ⁶	5,3.10 ⁴	72
1	14,37.10 ⁶	14,8.10 ⁶	14,66.10 ⁶	6.10 ⁴	120
2	14,8.10 ⁶	15,22.10 ⁶	15.10 ⁶	6,5.10 ⁴	160
3	15,22.10 ⁶	15,65.10 ⁶	15,6.10 ⁶	6,9.10 ⁴	100
4	15,65.10 ⁶	16,07.10 ⁶	16,05.10 ⁶	7.10 ⁴	142
5	16,07.10 ⁶	16,5.10 ⁶	16,49.10 ⁶	7,05.10 ⁴	120
6	16,5.10 ⁶	16,92.10 ⁶	16,9.10 ⁶	7,06.10 ⁴	80
7	16,92.10 ⁶	17,35.10 ⁶	17,33.10 ⁶	7,1.10 ⁴	123
8	17,35.10 ⁶	17,77.10 ⁶	17,72.10 ⁶	7,17.10 ⁴	220
9	17,77.10 ⁶	18,2.10 ⁶	18,1.10 ⁶	7,18.10 ⁴	300

Neste caso, o ponto ideal tem coordenadas com custo $C_{CCT(min)}^2 = \text{R\$}13.950.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^2 = 72000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.47) pelo círculo azul. Nesta curva Pareto-Ótimo, o ponto compromisso pertence ao subintervalo $k = 2$ (representada

pelo triângulo vermelho na Figura (5.47)) com custo $C_{CCT2}^2 = \text{R\$}15.000.000,00$ e produção de sacarose e fibra $P_{SF2}^2 = 65000$ toneladas, provenientes da cana-de-açúcar e cana-energia.

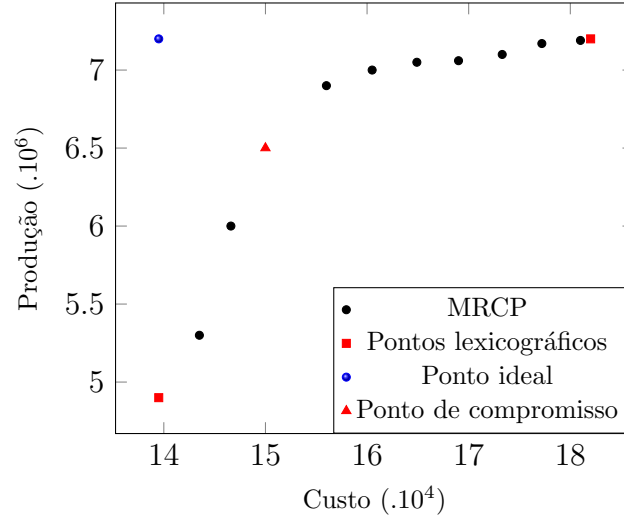


Figura 5.47: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.36).

A Tabela (5.37) mostra os resultados obtidos pela resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na segunda colheita da instância com 65 talhões.

Tabela 5.37 - Resultado para a segunda colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

k	$P_{SF_k(min)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFk}^2 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^2 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	4,9.10 ⁴	5,13.10 ⁴	5.10 ⁴	14,03.10 ⁶	81
1	5,13.10 ⁴	5,36.10 ⁴	5,26.10 ⁴	14,05.10 ⁶	300
2	5,36.10 ⁴	5,59.10 ⁴	5,4.10 ⁴	14,08.10 ⁶	150
3	5,59.10 ⁴	5,82.10 ⁴	5,6.10 ⁴	14,25.10 ⁶	200
4	5,82.10 ⁴	6,05.10 ⁴	5,83.10 ⁴	14,32.10 ⁶	80
5	6,05.10 ⁴	6,28.10 ⁴	6,08.10 ⁴	14,55.10 ⁶	120
6	6,28.10 ⁴	6,51.10 ⁴	6,29.10 ⁴	14,76.10 ⁶	65
7	6,51.10 ⁴	6,74.10 ⁴	6,52.10 ⁴	15,04.10 ⁶	80
8	6,74.10 ⁴	6,97.10 ⁴	6,76.10 ⁴	15,43.10 ⁶	220
9	6,97.10 ⁴	7,2.10 ⁴	6,82.10 ⁴	15,89.10 ⁶	320

Assim, nesta implementação, obtém-se como coordenadas do ponto de compromisso (coordenadas do ponto ideal: $C_{CCT(min)}^2 = \text{R\$}13.950.000,00$ de custo de cultivo, colheita e transporte e produção $P_{SF(max)}^2 = 72000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.48) pelo círculo

azul) pertencente ao subintervalo $k = 8$ (representado na Figura (5.48) pelo triângulo vermelho), de custo de cultivo, colheita e transporte $C_{CCT8}^2 = \text{R\$}15.430.000,00$ e produção $P_{SF8}^2 = 67600$ toneladas de sacarose e fibra, obtidos a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

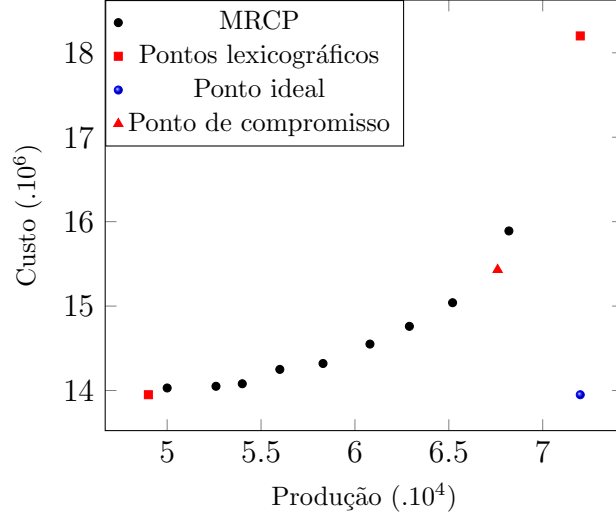


Figura 5.48: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.37).

Nesta curva Pareto-Ótimo, o maior espaçamento entre dois pontos eficientes ocorreu no subintervalo em que $k = 9$, definido pelo intervalo $[69700, 72000]$ relativos à produção de sacarose e fibra. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 9$ foi dividido em 5 novas partições. Assim, dividindo o intervalo da produção de sacarose e fibra em 5 partições, obtém-se a amplitude da produção de sacarose e fibra, ou seja, $P\Delta_9^2 = 460$. A Tabela (5.38) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.38 - Resultados da segunda colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

q	$P_{SF9q(min)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^2$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^2 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^2 (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	6,97.10 ⁴	7,016.10 ⁴	6,99.10 ⁴	15,88.10 ⁶	412
1	7,016.10 ⁴	7,062.10 ⁴	7,05.10 ⁴	16,23.10 ⁶	620
2	7,062.10 ⁴	7,108.10 ⁴	7,09.10 ⁴	17,23.10 ⁶	345
3	7,108.10 ⁴	7,154.10 ⁴	7,13.10 ⁴	17,45.10 ⁶	513
4	7,154.10 ⁴	7,2.10 ⁴	7,18.10 ⁴	17,95.10 ⁶	320

A Figura (5.49) mostra a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.37) e (5.38).

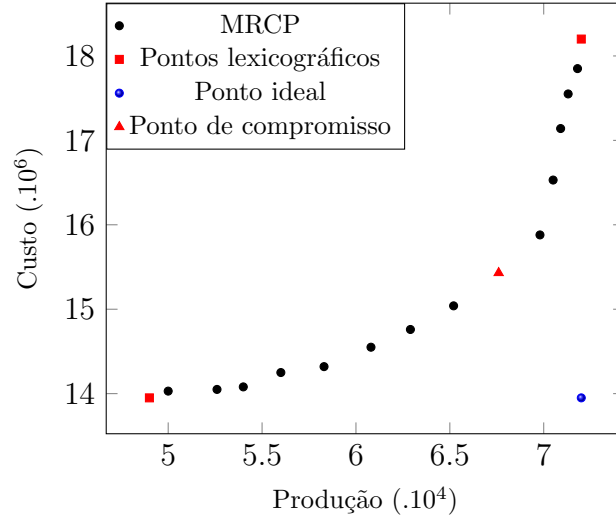


Figura 5.49: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabelas (5.37) e (5.38).

5.4.11 Resultados da terceira colheita na instância com 65 talhões

Na Tabela (5.39) são apresentados os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar e cana-energia para a terceira colheita na instância com 65 talhões.

Tabela 5.39 - Resultado para terceira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões

k	$C_{CCT_k}^3$ (R\$)	$C_{CCT_k}^3$ (R\$)	$C_{CCT_k}^3$ (R\$)	$P_{SF_k}^3$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	13,49.10 ⁶	13,89.10 ⁶	13,82.10 ⁶	5,3.10 ⁴	72
1	13,89.10 ⁶	14,29.10 ⁶	14,2.10 ⁶	5,8.10 ⁴	120
2	14,29.10 ⁶	14,69.10 ⁶	14,6.10 ⁶	6,4.10 ⁴	160
3	14,69.10 ⁶	15,09.10 ⁶	15,08.10 ⁶	6,7.10 ⁴	100
4	15,09.10 ⁶	15,49.10 ⁶	15,48.10 ⁶	6,8.10 ⁴	142
5	15,49.10 ⁶	15,89.10 ⁶	15,88.10 ⁶	6,85.10 ⁴	120
6	15,89.10 ⁶	16,3.10 ⁶	16,29.10 ⁶	6,9.10 ⁴	80
7	16,3.10 ⁶	16,7.10 ⁶	16,68.10 ⁶	6,96.10 ⁴	123
8	16,7.10 ⁶	17,1.10 ⁶	17,06.10 ⁶	6,98.10 ⁴	220
9	17,1.10 ⁶	17,5.10 ⁶	17,47.10 ⁶	6,99.10 ⁴	300

Na terceira colheita, o ponto ideal tem custo $C_{CCT(min)}^3 = \text{R\$}13.490.000,00$ e produção de $P_{SF(max)}^3 = 72000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.50) pelo círculo azul. O ponto de compromisso pertencente ao subintervalo $k = 2$ (representada pelo triângulo vermelho

na Figura (5.50)) com custo $C_{CCT2}^3 = \text{R}\$14.600.000,00$ e produção de $P_{SF2}^3 = 58000$ toneladas de sacarose e fibra, provenientes da cana-de-açúcar e cana-energia.

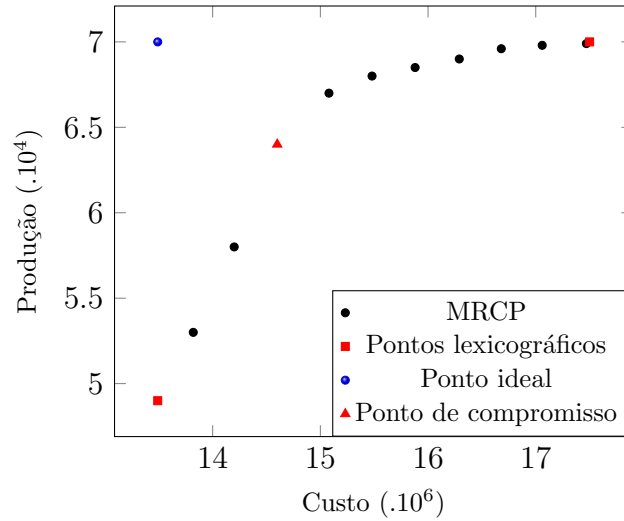


Figura 5.50: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.39).

A Tabela (5.40) mostra os resultados obtidos pela resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na terceira colheita da instância com 65 talhões.

Tabela 5.40 - Resultados para a terceira colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

k	$P_{SF_k(min)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFk}^3 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^3 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	4,9.10 ⁴	5,11.10 ⁴	5.10 ⁴	13,52.10 ⁶	81
1	5,11.10 ⁴	5,32.10 ⁴	5,23.10 ⁴	13,54.10 ⁶	300
2	5,32.10 ⁴	5,53.10 ⁴	5,3.10 ⁴	13,58.10 ⁶	150
3	5,53.10 ⁴	5,74.10 ⁴	5,54.10 ⁴	13,68.10 ⁶	200
4	5,74.10 ⁴	5,95.10 ⁴	5,78.10 ⁴	13,8.10 ⁶	80
5	5,95.10 ⁴	6,16.10 ⁴	5,96.10 ⁴	13,97.10 ⁶	120
6	6,16.10 ⁴	6,37.10 ⁴	6,17.10 ⁴	14,28.10 ⁶	65
7	6,37.10 ⁴	6,58.10 ⁴	6,41.10 ⁴	14,53.10 ⁶	80
8	6,58.10 ⁴	6,79.10 ⁴	6,6.10 ⁴	14,9.10 ⁶	220
9	6,79.10 ⁴	7.10 ⁴	6,7.10 ⁴	15,62.10 ⁶	320

Nesta implementação, o ponto de compromisso (coordenadas do ponto ideal: custo de cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)}^3 = \text{R}\$13.490.000,00$ e produção $P_{SF(max)}^3 = 72000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.51) pelo círculo azul) a do subintervalo $k = 8$ (representado

na Figura (5.51) pelo triângulo vermelho), com custo $C_{CCT8}^3 = \text{R\$}14.900.000,00$ e produção de sacarose e fibra $P_{SF8}^3 = 66000$ toneladas, obtidos a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

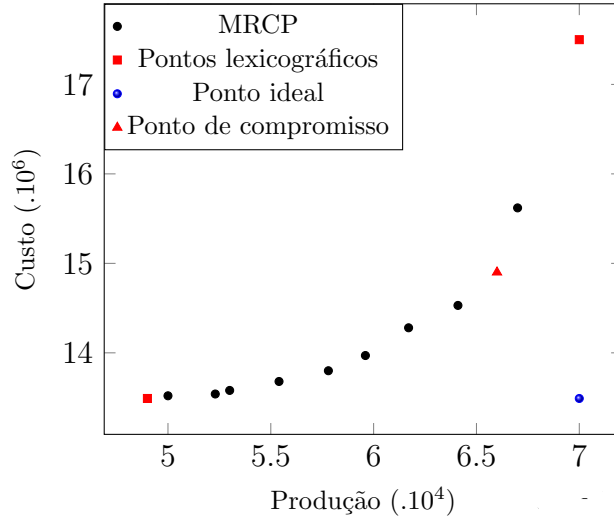


Figura 5.51: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.40).

Nesta curva Pareto-Ótimo da terceira colheita, o maior espaçamento entre dois pontos eficientes ocorreu no subintervalo em que $k = 9$, definido pelo intervalo $[67900, 71000]$ relativos à produção de sacarose e fibra. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 9$ foi dividido em 5 novas partições. Assim, dividindo o intervalo da produção de sacarose e fibra em 5 partições, obtém-se a amplitude da produção de sacarose e fibra, ou seja, $P\Delta_9^3 = 420$. A Tabela (5.41) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.41 - Resultados da terceira colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

q	$P_{SF9q(min)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^3$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^3 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q}^3 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$6,79.10^4$	$6,832.10^4$	$6,81.10^4$	$15,35.10^6$	342
1	$6,832.10^4$	$6,874.10^4$	$6,85.10^4$	$15,82.10^6$	580
2	$6,874.10^4$	$6,916.10^4$	$6,9.10^4$	$16,33.10^6$	620
3	$6,916.10^4$	$6,958.10^4$	$6,932.10^4$	$16,56.10^6$	703
4	$6,958.10^4$	7.10^4	$6,96.10^4$	$16,88.10^6$	320

A Figura (5.52) apresenta a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes das Tabelas (5.40) e (5.41).

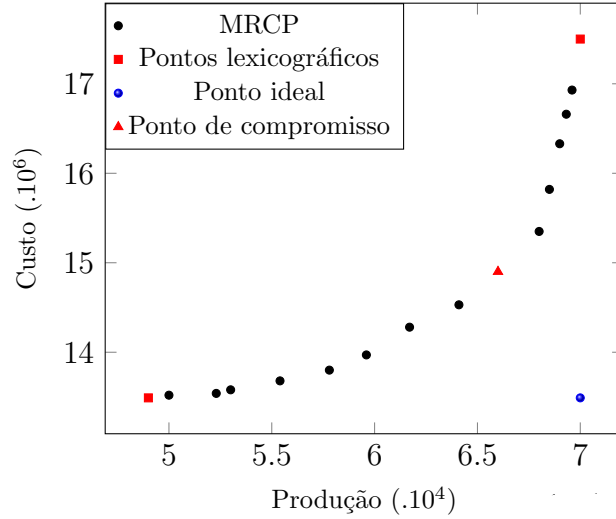


Figura 5.52: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.40) e (5.41).

5.4.12 Resultados da quarta colheita na instância com 65 talhões

Na Tabela (5.42) são apresentados os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar e cana-energia para a terceira colheita na instância com 65 talhões.

Tabela 5.42 - Resultado para quarta colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}^4$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}^4$ (R\$)	$C_{CCT_k}^4$ (R\$)	$P_{SF_k}^4$ (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	13,07.10 ⁶	13,45.10 ⁶	13,42.10 ⁶	5,2.10 ⁴	72
1	13,45.10 ⁶	13,84.10 ⁶	13,82.10 ⁶	5,8.10 ⁴	120
2	13,84.10 ⁶	14,22.10 ⁶	14,2.10 ⁶	6,3.10 ⁴	160
3	14,22.10 ⁶	14,6.10 ⁶	14,58.10 ⁶	6,6.10 ⁴	100
4	14,6.10 ⁶	14,98.10 ⁶	14,97.10 ⁶	6,7.10 ⁴	142
5	14,98.10 ⁶	15,37.10 ⁶	15,36.10 ⁶	6,75.10 ⁴	120
6	15,37.10 ⁶	15,75.10 ⁶	15,73.10 ⁶	6,79.10 ⁴	80
7	15,75.10 ⁶	16,13.10 ⁶	16,11.10 ⁶	6,8.10 ⁴	123
8	16,13.10 ⁶	16,52.10 ⁶	16,46.10 ⁶	6,85.10 ⁴	220
9	16,52.10 ⁶	16,9.10 ⁶	16,87.10 ⁶	6,87.10 ⁴	300

Na quarta colheita, com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10), o ponto ideal tem custo $C_{CCT(min)}^4 = \text{R\$}13.070.000,00$ e produção de $P_{SF(max)}^4 = 69000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.53) pelo círculo azul. Nesta curva Pareto-Ótimo, o ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 2$ (representada pelo triângulo vermelho na Figura (5.53)) com

$C_{CCT2}^4 = \text{R}\$14.520.000,00$ de custo e $P_{SF2}^4 = 59000$ toneladas de produção de sacarose e fibra, obtidos a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

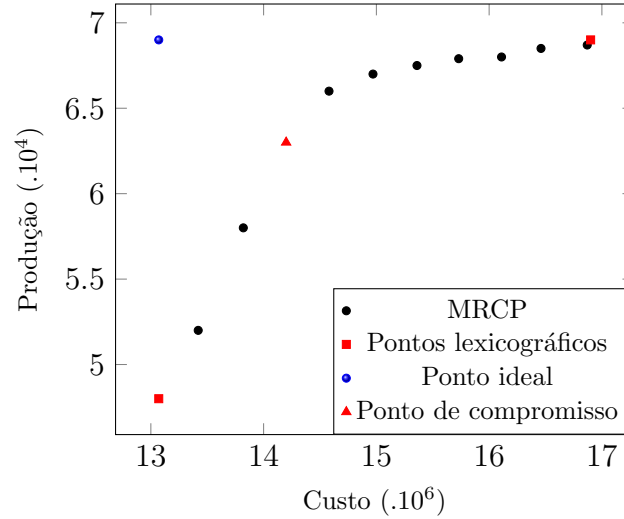


Figura 5.53: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.42).

A Tabela (5.43) mostra os resultados obtidos pela resolução do modelo mono-objetivo (4.11) em cada subintervalo da produção de sacarose e fibra na quarta colheita da instância com 65 talhões.

Tabela 5.43 - Resultados para a quarta colheita obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões.

k	$P_{SF_k(min)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFk}^4 ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk}^4 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	4,8.10 ⁴	5,01.10 ⁴	4,9.10 ⁴	13,1.10 ⁶	81
1	5,01.10 ⁴	5,22.10 ⁴	5,05.10 ⁴	13,16.10 ⁶	300
2	5,22.10 ⁴	5,43.10 ⁴	5,2.10 ⁴	13,2.10 ⁶	150
3	5,43.10 ⁴	5,64.10 ⁴	5,45.10 ⁴	13,33.10 ⁶	200
4	5,64.10 ⁴	5,85.10 ⁴	5,68.10 ⁴	13,46.10 ⁶	80
5	5,85.10 ⁴	6,06.10 ⁴	5,86.10 ⁴	13,6.10 ⁶	120
6	6,06.10 ⁴	6,27.10 ⁴	6,1.10 ⁴	13,8.10 ⁶	65
7	6,27.10 ⁴	6,48.10 ⁴	6,31.10 ⁴	14,08.10 ⁶	80
8	6,48.10 ⁴	6,69.10 ⁴	6,49.10 ⁴	14,43.10 ⁶	220
9	6,69.10 ⁴	6,9.10 ⁴	6,7.10 ⁴	14,98.10 ⁶	320

Nesta implementação do modelo mono-objetivo (4.11), o ponto de compromisso (coordenadas do ponto ideal: custo $C_{CCT(min)}^4 = \text{R}\$13.070000,00$ com produção $P_{SF(max)}^4 = 69000$ toneladas

de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.54) pelo círculo azul) está localizado no subintervalo $k = 8$ (representado na Figura (5.54) pelo triângulo vermelho), de custo de cultivo, colheita e transporte $C_{CT8}^4 = \text{R}\$14.430.000,00$ e produção de sacarose e fibra $P_{SF8}^4 = 64900$ toneladas, obtidos a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

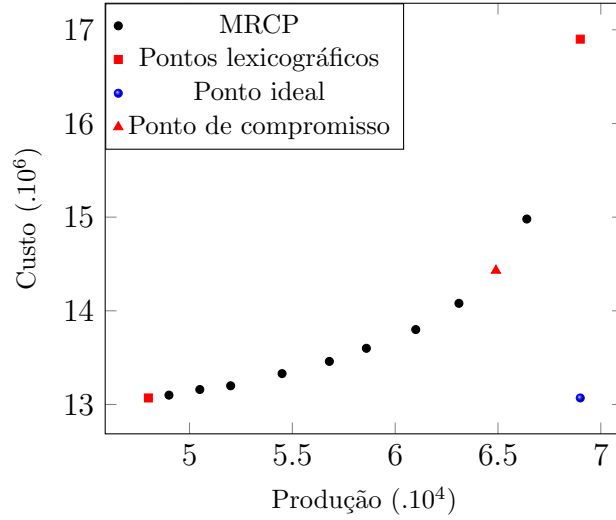


Figura 5.54: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.43).

Nesta curva Pareto-Ótimo, a maior distância entre dois pontos eficientes ocorreu no subintervalo em que $k = 9$, definido pelo intervalo $[66900, 69000]$ relativos à produção de sacarose e fibra. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 9$ foi dividido em 5 novas partições. Assim, dividindo o intervalo da produção de sacarose e fibra em 5 partições, obtém-se a amplitude da produção de sacarose e fibra, ou seja, $P\Delta_9^4 = 420$. A Tabela (5.44) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.44 - Resultados da quarta colheita para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

q	$P_{SF9q(min)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}^4$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q}^4 ($t.ha^{-1}$)	C_{CT9q}^4 ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	6,69.10 ⁴	6,732.10 ⁴	6,7.10 ⁴	14,98.10 ⁶	432
1	6,732.10 ⁴	6,774.10 ⁴	6,75.10 ⁴	15,22.10 ⁶	380
2	6,774.10 ⁴	6,816.10 ⁴	6,778.10 ⁴	15,63.10 ⁶	512
3	6,816.10 ⁴	6,858.10 ⁴	6,83.10 ⁴	16,1.10 ⁶	303
4	6,858.10 ⁴	6,9.10 ⁴	6,87.10 ⁴	16,58.10 ⁶	340

A Figura (5.55) mostra a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.43) e (5.44).

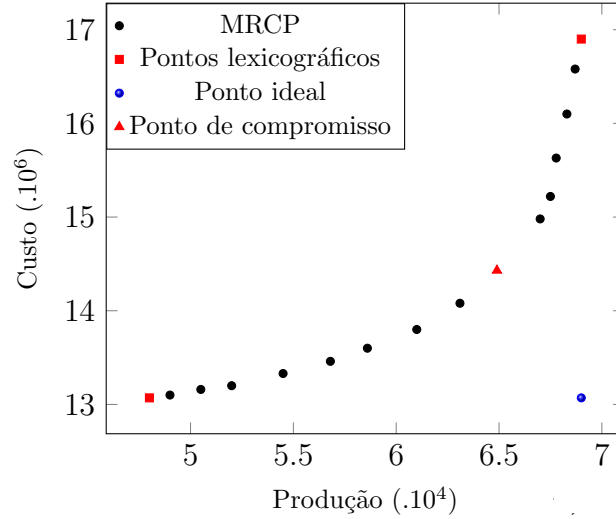


Figura 5.55: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.43) e (5.44).

5.4.13 Resultados considerando todas as colheitas da instância com 65 talhões.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos considerando todas as colheitas. O custo de plantio, cultivo, colheita e transporte (C_{CCT}) e a produção de sacarose e fibra (P_{SF}) é em relação ao período das quatro colheitas. As variedades de cana-de-açúcar e cana-energia selecionadas para o plantio nos talhões devem minimizar o custo e maximizar a produção de sacarose e fibra considerando todas as colheitas na instância com 65 talhões.

Na Tabela (5.45) são apresentados os resultados obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) em cada subintervalo do custo de cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar e cana-energia considerando todas colheitas na instância com 65 talhões.

Tabela 5.45 - Resultados considerando todas as colheitas obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.10) na instância com 65 talhões

k	$C_{CCT_k(min)}$ (R\$)	$C_{CCT_k(max)}$ (R\$)	C_{CCT_k} (R\$)	P_{SF_k} (t.ha ⁻¹)	Tempo de resolução (s)
0	54,99.10 ⁶	56,65.10 ⁶	56,38.10 ⁶	2,16.10 ⁵	72
1	56,65.10 ⁶	58,31.10 ⁶	58,18.10 ⁶	2,44.10 ⁵	120
2	58,31.10 ⁶	59,96.10 ⁶	59,68.10 ⁶	2,63.10 ⁵	160
3	59,96.10 ⁶	61,62.10 ⁶	61,6.10 ⁶	2,72.10 ⁵	100
4	61,62.10 ⁶	63,3.10 ⁶	63,22.10 ⁶	2,77.10 ⁵	142
5	63,3.10 ⁶	64,94.10 ⁶	64,93.10 ⁶	2,79.10 ⁵	120
6	64,94.10 ⁶	66,6.10 ⁶	66,52.10 ⁶	2,8.10 ⁵	80
7	66,6.10 ⁶	68,25.10 ⁶	68,16.10 ⁶	2,82.10 ⁵	123
8	68,25.10 ⁶	69,91.10 ⁶	69,7.10 ⁶	2,84.10 ⁵	220
9	69,91.10 ⁶	71,57.10 ⁶	71,42.10 ⁶	2,841.10 ⁵	300

O ponto ideal, considerando todas as colheitas na instância com 65 talhões, tem coordenadas custo de $C_{CCT(min)} = \text{R\$}54.990.000,00$ e $P_{SF(max)} = 285000$ toneladas produzidas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.56) pelo círculo azul. O ponto de compromisso pertence ao subintervalo $k = 2$ (indicada na Figura (5.56) pelo triângulo vermelho) tem coordenadas com custo $C_{CCT2} = \text{R\$}59.880.000,00$ e $P_{SF2} = 210000$ toneladas de produção de sacarose e fibra, obtidos a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

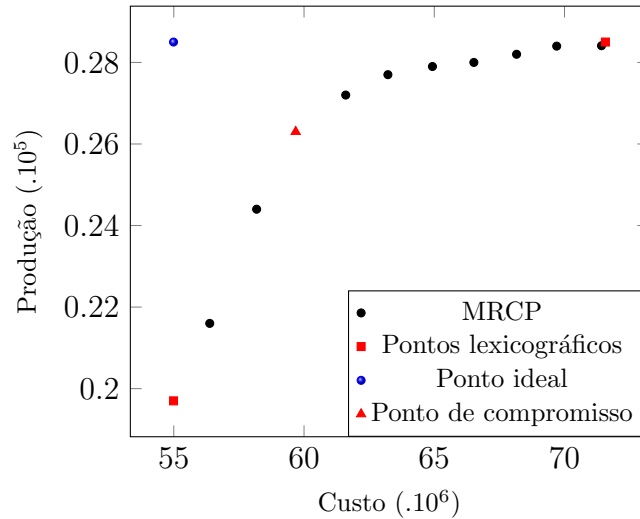


Figura 5.56: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.45).

A Tabela (5.46) apresenta os resultados obtidos pela resolução do modelo mono-objetivo (4.11) em cada subintervalo da produção de sacarose e fibra, considerando todas colheitas na

instância com 65 talhões.

Tabela 5.46 - Resultados considerando todas colheitas na instância com 65 talhões, obtidos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11).

k	$P_{SF_k(min)}$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF_k(max)}$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SFk} ($t.ha^{-1}$)	C_{CCTk} (R\$)	Tempo de resolução (s)
0	1,97.10 ⁵	2,058.10 ⁵	1,98.10 ⁵	55,02.10 ⁶	81
1	2,058.10 ⁵	2,146.10 ⁵	2,06.10 ⁵	55,4.10 ⁶	300
2	2,146.10 ⁵	2,234.10 ⁵	2,146.10 ⁵	55,6.10 ⁶	150
3	2,234.10 ⁵	2,322.10 ⁵	2,235.10 ⁵	56,17.10 ⁶	200
4	2,322.10 ⁵	2,41.10 ⁵	2,323.10 ⁵	56,66.10 ⁶	80
5	2,41.10 ⁵	2,498.10 ⁵	2,412.10 ⁵	57,53.10 ⁶	120
6	2,498.10 ⁵	2,586.10 ⁵	2,50.10 ⁵	58,24.10 ⁶	65
7	2,586.10 ⁵	2,674.10 ⁵	2,59.10 ⁵	59,24.10 ⁶	80
8	2,674.10 ⁵	2,762.10 ⁵	2,675.10 ⁵	60,78.10 ⁶	220
9	2,762.10 ⁵	2,85.10 ⁵	2,763.10 ⁵	64,22.10 ⁶	320

Assim, com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) para as todas colheitas da instância 65, obtém-se como ponto de compromisso (coordenadas do ponto ideal: custo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT(min)} = R\$54.990.000,00$ com produção $P_{SF(max)} = 285000$ toneladas de sacarose e fibra, indicada na Figura (5.57) pelo círculo azul) pertencente ao subintervalo $k = 8$ (representado na Figura (5.57) pelo triângulo vermelho), de custo de plantio, cultivo, colheita e transporte $C_{CCT8} = R\$60.780.000,00$ e $P_{SF8} = 267500$ toneladas de sacarose e fibra, obtidos a partir da cana-de-açúcar e cana-energia.

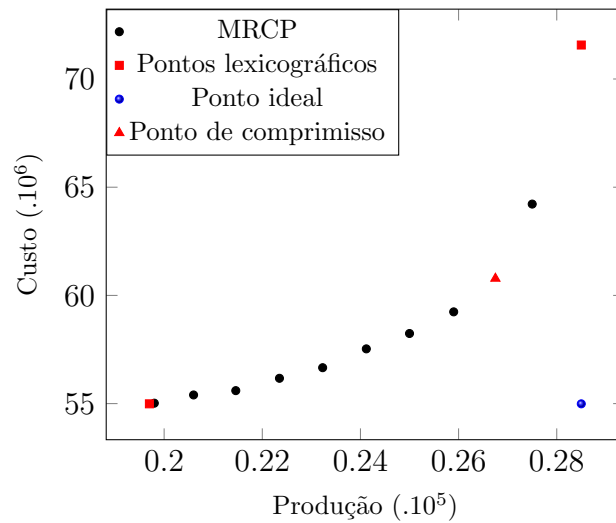


Figura 5.57: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados na Tabela (5.46).

Na curva Pareto-Ótimo de todas as colheitas da instância de 65 talhões, a maior distância entre dois pontos eficientes ocorreu no subintervalo em que $k = 9$, definido pelo intervalo [276200, 285000] relativos à produção de sacarose e fibra. Para determinar (possivelmente) novos pontos eficientes e preencher melhor este espaçamento, o subintervalo $k = 9$ foi dividido em 5 novas partições. Assim, dividindo o intervalo da produção de sacarose e fibra em 5 partições, obtém-se a amplitude da produção de sacarose e fibra, ou seja, $P\Delta_9 = 1760$. A Tabela (5.47) apresenta os resultados obtidos para cada uma das partições.

Tabela 5.47 - Resultados de todas as colheitas para os novos subintervalos com a resolução do modelo mono-objetivo (4.11) na instância com 65 talhões

q	$P_{SF9q(min)}$ ($t.ha^{-1}$)	$P_{SF9q(max)}$ ($t.ha^{-1}$)	P_{SF9q} ($t.ha^{-1}$)	C_{CCT9q} ($R\$$)	Tempo de resolução (s)
0	$2,762.10^5$	$2,78.10^5$	$2,763.10^5$	$64,22.10^6$	532
1	$2,78.10^5$	$2,8.10^5$	$2,79.10^5$	$65,38.10^6$	580
2	$2,8.10^5$	$2,82.10^5$	$2,81.10^5$	$66,8.10^6$	522
3	$2,82.10^5$	$2,833.10^5$	$2,826.10^5$	$67,93.10^6$	603
4	$2,833.10^5$	$2,85.10^5$	$2,84.10^5$	$68,94.10^6$	440

A Figura (5.58) mostra a curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.46) e (5.47).

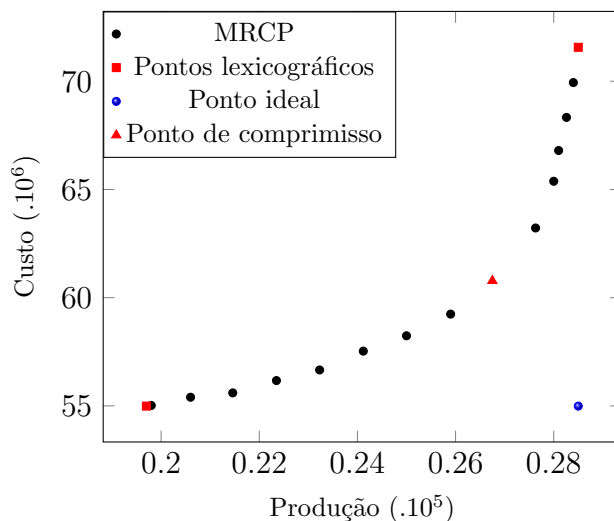


Figura 5.58: Curva Pareto-Ótimo dos pontos eficientes apresentados nas Tabelas (5.46) e (5.47).

5.4.14 Variedades selecionadas, agenda de plantio e colheita para cada colheita da instância com 65 talhões no ponto de compromisso

Para o ponto de compromisso de cada período de colheita determinadas com a resolução dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11) na instância com 65 talhões, verificou-se a porcentagem de talhões plantados para cada variedade de cana-de-açúcar e cana-energia selecionada, a porcentagem de talhões que receberam o plantio nos meses destinado ao plantio e a porcentagem de talhões que receberam a colheita nos meses de colheita.

A Figura (5.59) apresenta a porcentagem talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-de-açúcar e cana-energia selecionada no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.10).

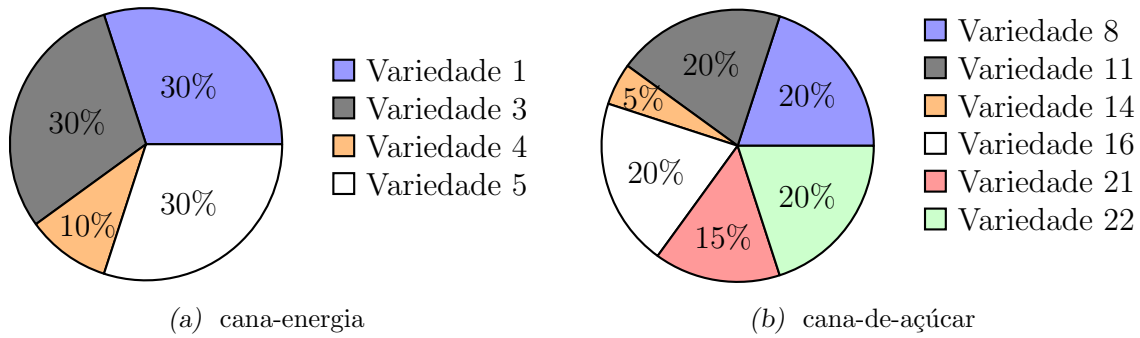


Figura 5.59: Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 65 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.10).

A seguir, a Figura (5.60) apresenta a porcentagem talhões que receberam o plantio de cada variedade de cana-de-açúcar e cana-energia selecionada no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.11).

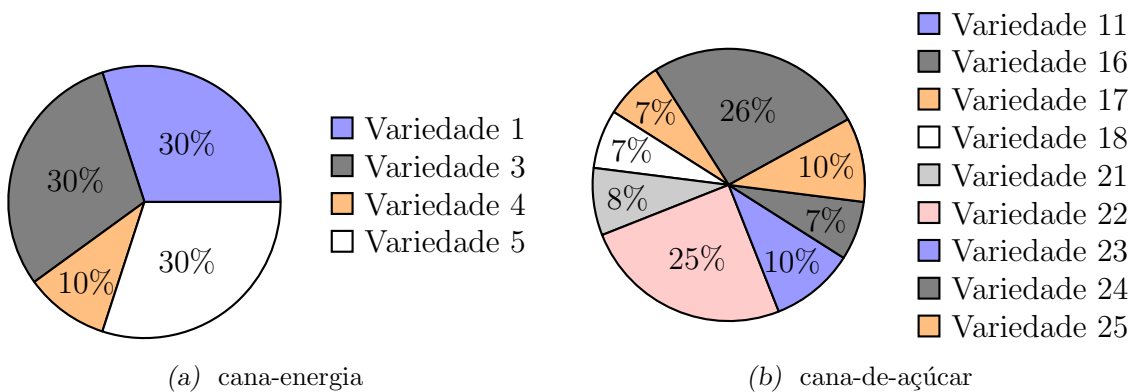


Figura 5.60: Porcentagem de talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar e cana-energia na instância com 65 talhões no ponto de compromisso determinado pelo modelo mono-objetivo (4.11).

A Figura (5.61) mostra a porcentagem de talhões na instância com 65 talhões, que receberam o plantio em cada mês destinado ao plantio no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).

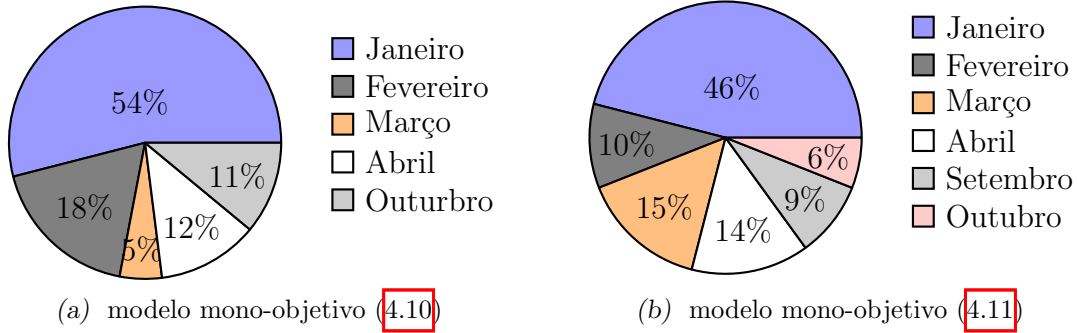


Figura 5.61: Porcentagem de talhões da instância com 65 talhões que receberam o plantio da cana-de-açúcar nos meses destinado ao plantio no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivos (4.10) e (4.11).

Observa-se pela Figura (5.61) que grande parte dos talhões foram destinados à cana de “ano e meio” por receberem o plantio nos meses de janeiro a março, fato que pode ser explicado pela maior produtividade da cana plantada neste período.

A Figura (5.62) mostra a porcentagem de talhões colhidos nos meses do primeiro período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

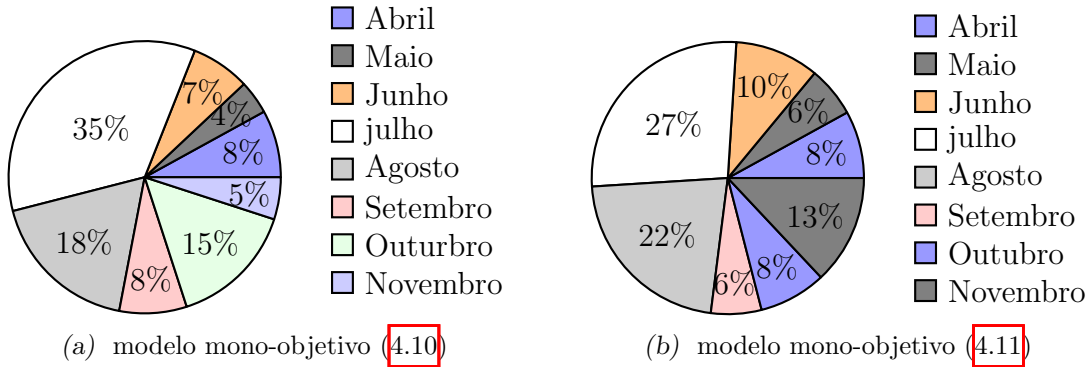


Figura 5.62: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do primeiro período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da implementação dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Nota-se, pela Figura (5.62) que por volta de 50% dos talhões foram colhidos entre os meses de junho a agosto, garantindo um desvio mínimo ou nulo do pico de maturação da cana-de-açúcar e cana-energia. Na primeira colheita, considerado também o custo de plantio da cana-de-açúcar e cana-energia, o ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.10) teve custo de

R\$15.500.000,00, com produção de 37580 toneladas de sacarose e 30420 toneladas de fibra e no ponto de compromisso do modelo-mono objetivo (4.11) obteve-se custo de R\$16.010.000,00, com produção de 38920 toneladas de sacarose e 30580 toneladas de fibra.

Na Figura (5.63) são apresentadas as porcentagens de talhões colhidos nos meses do segundo período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

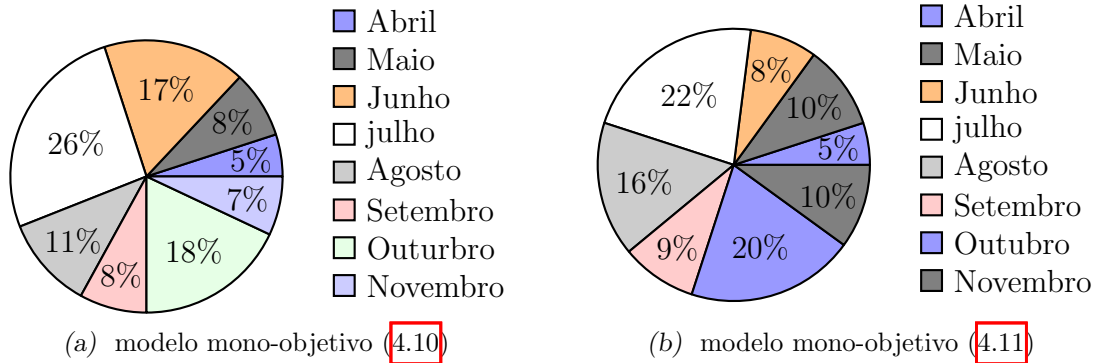


Figura 5.63: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do segundo período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Assim, no ponto de compromisso, o modelo mono-objetivo (4.10), selecionou variedades de cana-de-açúcar e cana-energia que geram 27000 toneladas de fibra e 33000 toneladas de sacarose, com custo de R\$15.200.000,00. O modelo mono-objetivo (4.11) selecionou variedades de cana-de-açúcar e cana-energia que geram 35000 toneladas de fibra e 37000 toneladas de sacarose, com custo de R\$15.430.000,00, para o ponto de compromisso.

Na Figura (5.64) são apresentadas as porcentagens de talhões colhidos nos meses do terceiro período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

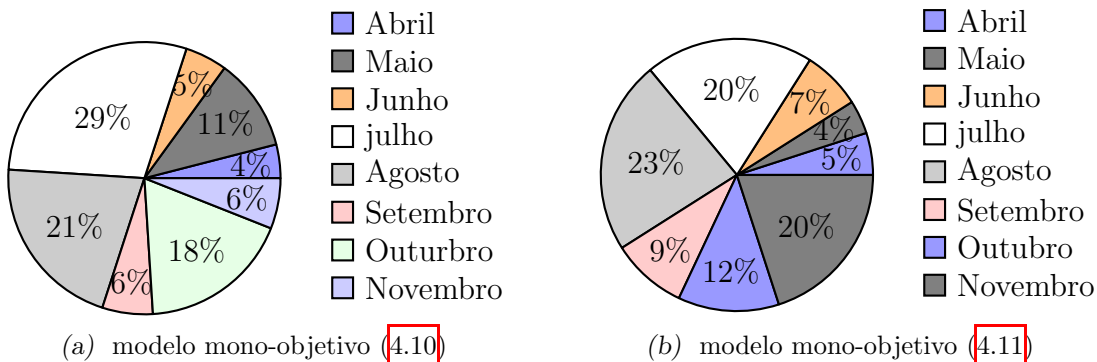


Figura 5.64: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do terceiro período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Nesta colheita, no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.10), foram selecionadas variedades de cana-de-açúcar e cana-energia que geram 34000 toneladas de fibra e 24000 toneladas de sacarose, com custo de R\$14.600.000,00. Com o modelo mono-objetivo (4.11), as variedades de cana-de-açúcar e cana-energia selecionadas podem produzir 36000 toneladas de fibra e 30000 toneladas de sacarose, com custo de R\$14.900.000,00 para o ponto de compromisso.

Na Figura (5.65) são apresentadas as porcentagens de talhões colhidos nos meses do quarto período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

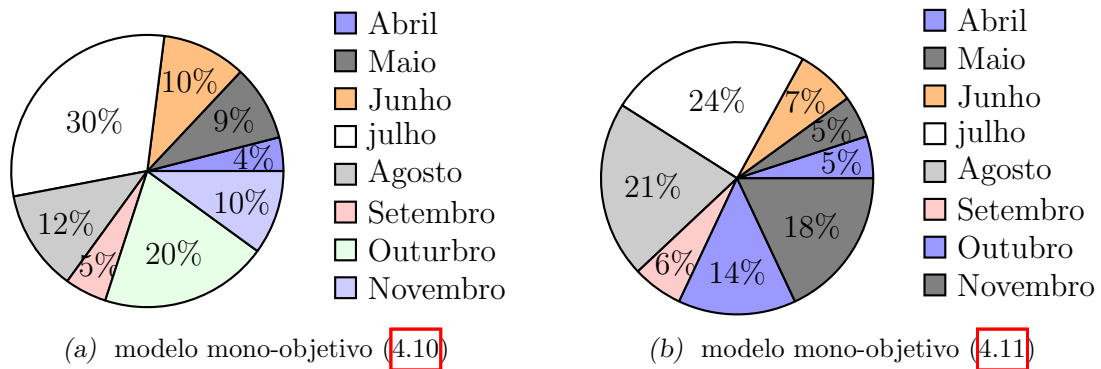


Figura 5.65: Porcentagem de talhões colhidos nos meses do quarto período colheita na instância com 65 talhões no ponto de compromisso da resolução dos modelos mono-objetivo (4.10) e (4.11).

Na quarta colheita da instância com 65 talhões, no ponto de compromisso do modelo mono-objetivo (4.10), foram escolhidas variedades de cana-de-açúcar e cana-energia que geram 35000 toneladas de fibra e 24000 toneladas de sacarose, com custo de R\$14.520.000,00. No modelo mono-objetivo (4.11), as variedades de cana-de-açúcar e cana-energia selecionadas podem produzir 34900 toneladas de fibra e 30000 toneladas de sacarose, com custo de R\$14.430.000,00 para o mesmo ponto eficiente.

Conclusão e propostas futuras

Este trabalho apresenta três modelos multiobjetivos para o problema integrado de plantio e colheita de cana-de-açúcar e cana-energia, visando maximizar a produção de sacarose e fibra e, simultaneamente, minimizar o custo operacional de plantio, cultivo, colheita e transporte, considerando uma ou mais safras de colheita. Com a seleção das variedades de cana-de-açúcar e de cana-energia, os modelos determinam um cronograma de plantio e colheita, levando em consideração as restrições operacionais do processo e as demandas mensais da usina. O primeiro e segundo modelo multiobjetivo considera apenas o plantio e colheita da cana planta. O terceiro modelo multiobjetivo considera o plantio, a colheita da cana planta e a colheita de uma ou mais da cana soca.

Os problemas multiobjetivos propostos foram transformados em conjuntos de sub-problemas mono-objetivos pelo MRCP, inserindo uma das funções objetivo no conjunto das restrições do modelo por meio de canalizações predeterminadas, possibilitando a investigação das soluções ótimas destes por métodos exatos. Assim, com os problemas multiobjetivos apresentados na forma mono-objetivo, canalizando uma das funções objetivos, foi possível, na maioria dos subintervalos, determinar, pelo menos, um ponto eficiente. Nos subintervalos que não foi encontrado ponto eficiente ou em curvas Pareto-Ótimo que os pontos eficientes ficaram muito dispersos, fez-se uma nova partição do subintervalo, criando novos subintervalos, possibilitando a investigação e busca de novos pontos eficientes, caso existissem. O tempo computacional de resolução dos modelos mono-objetivos foi, em média, de 90 segundos para instância com 30 talhões e para instância com 65 talhões, a média foi de 320 segundos. Para uma instância de 100 talhões, a resolução do modelo mono-objetivo não retornou soluções, reforçando assim, o uso de métodos heurísticos para a determinação de pontos eficientes para instâncias com maior número de talhões.

A aplicação do MRPC para representar modelos multiobjetivos em um conjunto de subproblemas mono-objetivos, possibilita a resolução dos modelos multiobjetivos com dados de variedades de cana-de-açúcar, cana-energia e instâncias com maior número de números de talhões do que os

resolvidos neste trabalho, porém, com aplicações de métodos meta-heurísticos e bio-inspirados, devido a limitação computacional de resolução destes por métodos exatos.

Dos pontos eficientes apresentados, deu-se maior destaque ao ponto de compromisso, o qual está mais próximo do ponto ideal do problema e melhor equilibra a correlação custo e produção, priorizando a maximização da produção de sacarose e fibra e considerando a limitação dos custos operacionais da usina. Assim, verificou-se que os modelos garantiram que mais de 50% dos talhões recebessem “cana de ano e meio” por se tratar do tipo de plantio que proporciona maior produtividade de sacarose e fibra. Além disto, a maioria dos talhões destinados ao plantio da cana-de-açúcar foram colhidos no pico de maturação e os destinados ao plantio da cana-energia, foram colhidos com o desvio do pico de maturação igual a 3, garantindo maior tempo desta espécie de cana na lavoura e maior produtividade de fibra.

A metodologia de pesquisa proposta é promissora, tendo potencial para auxiliar no gerenciamento otimizado da produção tanto da cana-de-açúcar quanto da cana-energia, com possibilidade de operar, de acordo com o interesse da usina, prorizando a produção de sacarose e fibra com custos limitados pela usina ou com a priorização dos custos delimitando a produção de sacarose e fibra.

Como orientação para pesquisas futuras, sugere-se o desenvolvimento de um método heurístico que seja capaz de obter soluções viáveis, de boa qualidade em menor tempo computacional, permitindo a aplicação em instâncias de grande escala. Outra sugestão é melhorar o terceiro modelo multiobjetivo, de forma que reconheça talhões que já foram realizadas uma ou mais colheitas, calculando a produção de sacarose e fibra, bem como o custo de cultivo, colheita e transporte para as próximas colheitas nestes talhões, inclusive efetuando o replantio desse caso seja realizada a última colheita dentro do período considerado.

6.1 *Trabalhos apresentados em eventos e publicações*

TOLENTINO, G., BALBO, A. R., POLTRONIERE, S. C., FLORENTINO, H. O. *Otimização multiobjetivo aplicada ao processo de produção de sacarose e fibra a partir da cana-de-açúcar e cana-energia*. VI ERMAC, 2019a.

TOLENTINO, G., BALBO, A. R., POLTRONIERE, S. C., FLORENTINO, H. O. *Planejamento otimizado do cultivo da cana-de-açúcar e da cana-energia para a produção de sacarose e fibra* XXVI SIMPEP, 2019b.

TOLENTINO, G., BALBO, A. R., POLTRONIERE, S. C., FLORENTINO, H. O. *Planejamento otimizado do cultivo da cana-de-açúcar e da cana-energia para a produção de sacarose e fibra. In: Gestão da Produção em Foco - volume 40. 1. ed. Poisson, 2020. cap. 08, p.74-83.*

Referências Bibliográficas

ALEXANDER, A.G. Energy cane as a multiple-products alternative. In: POST-CONFERENCE SEMINAR, Hawaii, USA, 1984. Proceedings...Hawaii, USA: Aiea Library, Hawaii Natural Energy Institute, Aiea, Hawaii, USA, Nov., 1985. 17p.

ALBUQUERQUE, M.C.C., NICOL, R.. Economia agrícola. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.

ALIANO FILHO, A. Novas extensões de técnicas de escalarizações no problema de corte unidimensional inteiro multiobjetivo. 2016. (204 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática Estatística e Computação Científica, Campinas, SP. Disponível em: < [http : //www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/322166](http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/322166) >.

ANJOS, I.A. dos.; FIGUEIREDO, P. A. M. de. Aspectos fitotécnicos do plantio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LAN DELL, M. G. de A. (Ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. 882p.

ANSELMÍ, R. Zoneamento orienta expansão da cana na “fazenda” Brasil. *Jornal Cana*, Fevereiro/2008.

ÁVILA, S.L. Algoritmos genéticos aplicados na otimização de antenas refletoras. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BAIÃO, A., 2004. As culturas energéticas no âmbito do PAC, *Revista Espaço Rural*, CONFRAGI, 40, 2004.

BAKKER, H. Sugar cane cultivation and management, Kluwe Acad/Plenum Publishers, New

York, 1999.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. Nonlinear Programming: theory and algorithms. 3^a ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

BEAULAIR, E.G. F.; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T. C.C.; RIPOLI, M. L.C.; CASAGRANDE, D.V. (Org). Plantio de cana de açúcar: estado da arte. Piracicaba: Ed. dos Autores, 2006. v. 1. p 80-91.

BIGATON, A. et al. Previsão de custos do setor sucroenergético na região Centro-Sul do Brasil: safra 2017/18. Revista Ipecege, Piracicaba, ago. 2017. Disponível em: <https://revista.ipecege.com/Revista/article/view/185/106>. Acesso em: 04 mar. 2019.

BRAUNBECK, O.; OLIVEIRA, J. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n.1, p. 300-308, jan./abr. 2006.

BRIGHENTI, C. R. F. Integração do cogenerador de energia do setor sucroalcooleiro com o sistema elétrico. São Paulo, 2003. 169p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CALMON, P. História social do Brasil: espírito da sociedade colonial. v. 1, São Paulo: Martins Fontes, 2002.

CAVERSAN, A.S. Modelo matemático para planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia. 2017. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - FEB/UNESP, Bauru, 2017

CERVI, R. G. Modelagem Matemática para Maximização da Produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e Impactos sobre o Custo de Operações Mecanizadas de Corte e Carregamento. Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, Botucatu, p.1-97, 2013.

COELLO, C. A. C; LAMONT, G. B.; VAN VELDHUIZEN, D. A. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

Relatório Técnico.

COLETI, J.T.; STUPIELLO, J.J.; Plantio da cana-de-açúcar. In. SEGATO, S.V; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M.. Atualizações em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>, acesso em 14 de janeiro de 2020.

DANTAS FILHO, P. L. Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-açúcar: um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Energia, São Paulo: USP. 2009.

EHRGOTT, M. Multicriteria optimization. Vol. 491. Springer Science & Business Media, 2005.

EMBRAPA, Plantio da cana-de-açúcar de ano e meio, com base no risco climático (prática agropecuária) Publicado em 22 de março de 2016. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4519/plantio-da-cana-de-acucar-de-ano-e-meio-com-base-no-risco-climatico-pratica-agropecuaria>, acesso em 12 de janeiro de 2020.

ESPINOZA, J.G. Maduración de la caña de azúcar y floración de la caña de azúcar y su manejo. In: MELGAR, M. et al. El cultivo de la Caña de Azúcar En Guatemala. 1 ed. Guatemala. Editorial Artemis Edinter, 2012. Centro de investigación de la caña de azúcar (CENGICANA). Cap. XI, 2012. p. 262-281.

EVERSEN, C.I., MUCHOV, R.C., EL-SWAIFY, A., OSGOOD, R.V. Yield accumulation in irrigated sugarcane. I. Effect of crop age and cultivar. Agronomy Journal, 89:638-646, 1997.

GILMALVA, M. J.; CLARKE, S. J.; STEIN, J. M. Sugarcane hybrids of biomass. Biomass 6:61-68, 1984.

FRASSON, F.R. Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar. 2007. 76p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

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.; IRAWAN, C.; ALIANO, A. F.; JONES, D. F.; CANTANE, D. R.; NERVIS, J. J. A multiple objective methodology for sugarcane harvest management with varying maturation periods. *Annals of Operations Research*, v. 267, n. 1-2, p. 153-177, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/178988>; acesso em 15/03/2020.

FLORENTINO, H., JONES, D., IRAWAN, C., D., O., KHOSRAV, B., CANTANTE, D.R. An optimization model for combined selecting, planting and harvesting sugarcane varieties. *Annals of Operations Research* 1, 1-2, 1–19, 2020.

FURLAN, F.F., COSTA, C.B.B., FONSECA, G.C., SOARES, R.P., Secchi, A.R., Cruz, A.J.G., Giordano, R.C., 2012. Assessing the production of first and second generation bio-ethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling. *Comput.Chem. Eng.*, 43, 1-9.

GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Massachusetts: Addison-Wesley, 1989. 432 p.

GOLDEMBERG, J.; DONDERO, J. D. Energia Meio ambiente & Desenvolvimento. 2.ed. São Paulo: Edusp, 2003.

GONÇALVES, E.; BALBO, A. R.; DA SILVA, D. N.; NEPOMUCENO, L.; BAPTISTA, E. C.; SOLER, E. M. Deterministic approach for solving multi-objective non-smooth Environmental and Economic dispatch problem. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*, v. 104, p. 880-897, 2019.

GROFF, A. M. Fatores de Produção Agropecuária: Apostila, transparências e notas de

aulas. Campo Mourão: PP, Departamento de Engenharia de Produção, FECILCAM, 2010.

GUARDABASSI, Patrícia Maria. Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento. São Paulo, 2006. 126p.Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

HILL, J.; NELSON, E.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; TIFFANY, D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Science* 103(43):11206-11210, 2006.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass and Bioenergy*, v. 46, p. 564–573, nov. 2012.

HOLANDA, S. B. .Raízes do Brasil. São Paulo: Companhia das Letras. 1995

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

JANINI, D. Análise operacional e econômica do sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar *Saccharum spp.* *Stab*, v. 26, n. 4, p. 53-57, 2007.

JOHNSON, J.M.F.; COLEMAN, M.D.; GESH, R.; JARADAT, A.; MITCHELL, R.; REICOSKY, D.; WILHELM, W.W. Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology**, Kagawa-ken, v.1, n.1, p.1-28, 2007

JONES, D.; TAMIZ, M. Practical goal programming. New York: Springer, 2010.

JUNQUEIRA, R. d. R., MORABITO, R. Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. *International Journal of Production Economics* 213, 150–160, 2019.

KNOLL, J.E.; ANDERSON, W.F.; RICHARD, E.P. Harvest date effects on biomass quality and ethanol yield of new energycane (*Saccharum hyb.*) genotypes in the Southeast USA. *Biomass and Bioenergy*, Aberdeen, UK, v. 56, p. 147–156, 2013.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, I. L., VASCONCELOS, A. C. M., LANDELL, M. G.A. (Ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008

LIMA, C. D.; BALBO, A. R.; HOMEM, T. P. D.; 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. 68, p. 147-164, 2017.

MACEDO, I.C. et al. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.

MAGNOLI, D.. O mundo contemporâneo. São Paulo: Ática, 1992.p. 174

MATSUOKA S., BRESSIANI J. A., MACCHERONI W., FOUTO I.: Bionergia da Cana. Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool. Volume 1. Edited by: Santos F, Borém A, Caldas C., UFV, Viçosa, 2012

MATSUOKA, S. et al. A evolução do Proálcool. Revista Agroanalysis, Mercado & Negócios, v. 35, p. 29-30, 2016.

MIETTINEN, K. Nonlinear multiobjective optimization. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

MILANEZ, A. Y.; CAVALCANTI, C. E. S.; FAVERET FILHO, P. S. C. O papel do BNDES no desenvolvimento do setor sucroenergético. In: ALÉM, A. C.; GIAMBIAGI, F. (Orgs.) . O BNDES em um Brasil em Transição. Rio de Janeiro: BNDES, p. 335-347, 2010.

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

NERVIS, J. J.; FLORENTINO, H. O.; CANTANE, D. R.; RAMOS, R. P. ; ISLER, P. R. . Simulação para a Otimização da Colheita da Cana-de-açúcar. REVISTA BRASILEIRA

DE BIOMETRIA, v. 35, p. 415-439, 2017.

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

NOVACANA, Com muitos desafios, cana-energia avança no Brasil. Publicado em 22 de março de 2016. Disponível em ; <https://www.novacana.com/n/cana/variedades/desafios-cana-energia-avanca-brasil-220316>; acesso em 05 de janeiro de 2020.

NOVACANA, As perspectivas para as safras 2017/1018 e 2018/2019 e para o mercado. Publicado em 13 de setembro de 2017. Disponível em ; <https://www.novacana.com/n/eventos/perspectivas-safras-2017-18-2018-19-mercado-130917>; acesso em 16 de dezembro de 2019.

PEREIRA, L. L.; TORREZAN, H. F. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J. C. M. de. Atualização em produção de cana de açúcar. Piracicaba: CP 2m, 2006. p.333-344.

PRADO JUNIOR, Caio. História econômica do Brasil. São Paulo:Brasiliense, 1970.

POLTRONIERE, S.C., ALIANO FILHO, A., CAVERSAN, A.S., BALBO, A.R., FLORENTINO, H.O.. Integrated planning for planting and harvesting sugarcane and energy-cane for the production of sucrose and energy. Computers and Electronics in Agriculture Accepted for publication, 2021.

RAMOS, R. P. Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização. 1014. 123f. Tese (Doutorado em Agronomia) - FCA/UNESP, Botucatu, 2014.

RAMOS, P. R.; ISLER, P. R.; FLORENTINO, H. O.; DYLAN, J.; & NERVIS, J.J. An optimization model for the combined planning and harvesting of sugarcane with maturity considerations. African Journal of Agricultural Research, 11(40), 3950 -3958, 2016.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. Journal of Agronomy and Crop Science, v. 185, n. R, p. 249-258.

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JÚNIOR, W. F, RIPOLI, M.L.C. cultura cana-vieira: um desperdício energético. Maquinaria Agrícola, são paulo, v. 6, n. 1, p. 2-3, jan. 1991.

RIPOLLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. da Universidade de São Paulo, 2004. ISBN 85-904440-5.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. 2.ed. Piracicaba: Ed. Autor, 2005. 302 p.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C.; VILLA NOVA, N. a. Sugar cane crop residue and bagasse for cogeneration in Brazil. tsae/asabe. Kohn Kaen, Faculty of engineering, Kohn Kaen University. 2007.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M.L.C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Edição dos autores. Piracicaba, 2009. 333p

RODRIGUES, E. B. Comparação técnico-econômica da colheita de cana-de-açúcar na região de Bandeirantes-PR. 2008. 27p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Estadual de Londrina.

RODRIGUES, J.D. Fisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: UNESP, 1995. 100p. (Apostila).

SANTOS, M. R. B. Métodos de pontos interiores/exteriores, de restrições canalizadas progressivas e de suavização arco tangente, em problemas de despacho econômico e ambiental. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - FEB/UNESP, Bauru, 2016.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E. Atualização em produção de

cana-de-açúcar. Piracicaba: Livroceres, 2006. p.19-36.

SILVA, L. I. L. da. Globales Regieren: Die Herausforderung der nachhaltigen Entwicklung und die Rolle der Biotreibstoffe. In: WÜRTELE, G. (Ed.) Machtworte. Wirtschaftslenker und Staatsmänner stellen sich den Fragen der Zukunft. Frankfurt am Main: s. n., 2007. p.59-70.

SILVEIRA, L.C.I. da; BARBOSA, M.H.P.; OLIVEIRA, M.W. de. Manejo de variedades de cana-de-açúcar predominantes nas principais regiões produtoras de cachaça de Minas Gerais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.23, n.217, p.25-32, 2002.

SZMRECSANYI, T. et al. Dimensões, riscos e desafios da atual expansão canavieira. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

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. 2017, 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - FEB/UNESP, Bauru, 2017.

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

UNICA, União da Indústria de Cana-de-Açúcar. BIOELETRICIDADE: O QUE FALTA PARA ESTA ALTERNATIVA ENERGÉTICA DESLANCHAR. Disponível em: <http://www.unica.com.br/colunas/470156692036979688/bioeletricidade-por-cento3A-o-que-falta-para-esta-alternativa/> Acesso em: 10 jul. 2019

UNICA, União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Os números finais da safra 2019/2020 . Disponível em: <http://unicadata.com.br/listagem.phpidMn=116> Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

Apêndice

Apêndice A

Conceitos e definições de problemas multiobjetivos

Neste apêndice são apresentados os principais conceitos e definições da Otimização Multiobjetivo (OM), bem como, uma metodologia para encontrar um conjunto de soluções eficientes. Nestes problemas há mais do que uma função para ser otimizada e, assim, a "solução ótima" não tem o mesmo sentido do que num problema de otimização mono-objetivo e, com isso, as noções de *soluções eficientes* e *não dominadas* devem ser definidas. Baseado em Aliano Filho (2016), Ehrgot (2000) e Miettinen (1999), são apresentadas as definições e conceitos da OM a seguir.

A.1 Definições e conceitos de OM

São apresentados a seguir as definições de otimização, bem como, a formalização dos conceitos de otimalidade em problemas de otimização multiobjetivo.

Definição A.1 (Problema geral de otimização multiobjetivo). *Um problema de otimização multiobjetivo (POM) tem um número de funções objetivos $r > 1$ que devem ser minimizadas, sujeito a um conjunto viável $\emptyset \neq \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^n$. De forma geral, um POM é apresentado da forma:*

$$\text{Minimize } z = (f_1(x), \dots, f_r(x))$$

$$\text{Sujeito a } x \in \mathcal{X} = \{x \in \mathbb{R}^n : g_j(x) \leq 0, j = 0, \dots, l\} \quad (\text{A.1})$$

Em que:

- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$: vetor das variáveis decisórias;
- $z_k = f_k(x)$: k -ésima função objetivo a ser minimizada, $k = 1, \dots, r$;
- $\emptyset \neq \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^n$: espaço de decisão ou factível, gerada pelas l restrições $g_j(x) \leq 0$.

Num POM é suposto que todas as funções objetivo sejam conflitantes entre si, ou seja, a minimização em uma ocasiona o aumento de pelo menos uma outra função.

Definição A.2 (Espaço Critério). *O espaço $\mathcal{Z} \subseteq \mathbb{R}^r$ gerado pela aplicação das r funções objetivos no espaço $\mathcal{X}$ é chamado de espaço critério ou objetivo. Formalmente: $\mathcal{Z} = \{z \in \mathbb{R}^r : z = f(x), \forall x \in \mathcal{X}\}$*

Definição A.3 (Função convexa e côncava). *Uma função $\phi : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ é chamada de convexa se para quaisquer pares de vetores x_1 e $x_2 \in \mathbb{R}^n$ e para todo $\lambda \in [0, 1]$, a seguinte condição é verdadeira*

$$\phi(\lambda.x^1 + (1 - \lambda).x^2) \leq \lambda.\phi(x^1) + (1 - \lambda).\phi(x^2) \quad (\text{A.2})$$

Uma função é concava se $-\phi$ é convexa.

Definição A.4 (Conjunto convexo). *Um conjunto Ω é convexo se, para quaisquer pontos x_1 e $x_2 \in \Omega$, a combinação convexa linear entre eles, $\bar{x} = \lambda.x_1 + (1 - \lambda).x_2$ com $\lambda \in [0, 1]$, também pertencer ao conjunto Ω .*

Lema A.1. *O conjunto $\mathcal{X} = \{x \in \mathbb{R}^n : g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, l\}$ é convexo se g_j for convexa para todo $j = 1, \dots, l$.*

Demonstração. Vide Aliano Filho (2016) pág. 29 □

Definição A.5 (Problema de otimização multiobjetivo convexo). *Um POM é convexo se $z_k = f_k(x)$ é convexa para todo $k = 1, \dots, r$ e o conjunto $\mathcal{X}$ é convexo (ou seja, se $g_j(x)$ for convexa para todo $j = 1, \dots, l$).*

Um POM em que z_k e g_j são lineares é convexo se $x \in \mathbb{R}^n$. Além disso, $\mathcal{Z}$ é convexo. No entanto, se $x \in \mathbb{Z}^n$, o conjunto $\mathcal{Z}$ não necessariamente será convexo. Sendo esta uma grande dificuldade para resolver um POM linear e combinatório. Sendo r funções objetivo conflitantes entre si, não existe um ponto $x^* \in \mathcal{X}$ que as minimizam simultaneamente. Assim, pode-se minimizar individualmente cada uma destas r funções objetivo e construir um vetor definido a seguir.

Definição A.6 (Vetor ideal). *O vetor $z^I = (z_1^I, \dots, z_r^I) \in \mathcal{Z}$ é chamado de ideal quando sua k -ésima (z_k^I) componente é o valor mínimo do seguinte problema mono-objetivo:*

$$\text{Minimize } z_k = f_k(x)$$

$$\text{Sujeito a } x \in \mathcal{X} \quad (\text{A.3})$$

em geral, a imagem inversa z^I é um ponto infactível.

Definição A.7 (Vetor utópico). O vetor $z^U = (z_1^U, \dots, z_r^U) \in \mathcal{Z}$ é chamado de *Utópico* e sua k -ésima componente é tal que $z_k^U = z_k^I - \epsilon_k$, para todo $k = 1, \dots, r$ e $\epsilon_k > 0$.

A comparação e avaliação de soluções factíveis em um POM é feita utilizando as relações de dominância, apresentadas a seguir.

Definição A.8 (Dominância). Uma solução x_1 domina outra solução x_2 , ambas pertencentes ao conjunto $\mathcal{X}$, se as condições a seguir são satisfeitas:

- A solução x_1 não é pior que a solução x_2 em todos os objetivos, isto é, $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, $k = 1, \dots, r$.
- A solução x_1 é estritamente melhor que a solução x_2 em pelo menos um componente $\bar{k} \in \{1, \dots, r\}$, isto é, $f_{\bar{k}}(x_1) < f_{\bar{k}}(x_2)$.

Assim, a solução x_1 domina a solução x_2 , ou a solução x_2 é dominada pela solução x_1 . E notação: $x_1 \preceq x_2$. O caso em que x_1 não domina x_2 , a notação fica: $x_1 \not\preceq x_2$.

Note que as soluções são comparáveis quando uma domina a outra. Porém, pode acontecer que $x_1 \not\preceq x_2$ nem $x_2 \not\preceq x_1$. Além disso, se $x_1 \not\preceq x_2$ não implica que $x_2 \preceq x_1$.

Definição A.9 (Solução eficiente). Na otimização multiobjetivo uma solução $x^* \in \mathcal{X}$ é chamada eficiente ou ótima, se não existe uma outra solução $x \in \mathcal{X}$, de maneira que $x \preceq x^*$

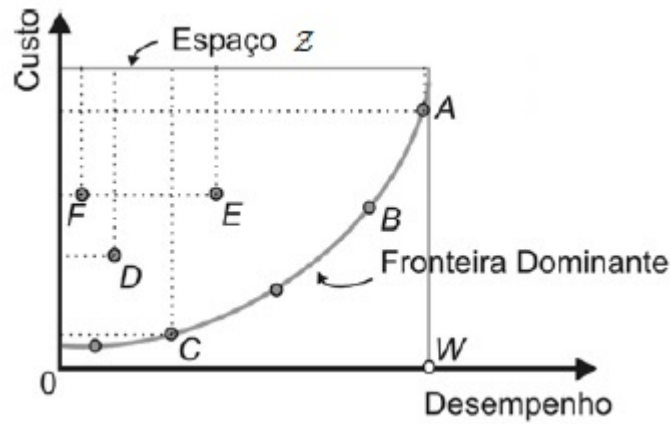
Definição A.10 (Ponto não dominado). Um ponto z^* no espaço de critério $\mathcal{Z}$ é chamado de não dominado se sua imagem inversa é uma solução eficiente, ou seja, $z^* = f(x^*)$.

Definição A.11 (Conjunto eficiente). O conjunto eficiente denotado por $\mathcal{X}^*$ são todos os elementos de $\mathcal{X}$ que não são dominados por nenhum membro de $\mathcal{X}$, ou seja, $\mathcal{X}^* = \{x^* \in \mathcal{X} : x \not\preceq x^*, \forall x \in \mathcal{X}\}$

Definição A.12 (Espaço critério não dominado). A imagem do conjunto eficiente $\mathcal{X}^*$ é o conjunto $\mathcal{Z}^* \subseteq \mathcal{Z}$ e chamado de espaço critério não dominado. Formalmente, $\mathcal{Z}^* = \{z^* \in \mathbb{R}^r : z^* = f(x^*), \forall x^* \in \mathcal{X}^*\}$. Para o caso $r = 2$ objetivos, o conjunto não dominado é chamado de fronteira de Pareto.

A figura [\(A.1\)](#) a seguir apresenta a fronteira de Pareto de um problema multiobjetivo ($k = 2$) envolvendo maximização de desempenho e minimização de custos.

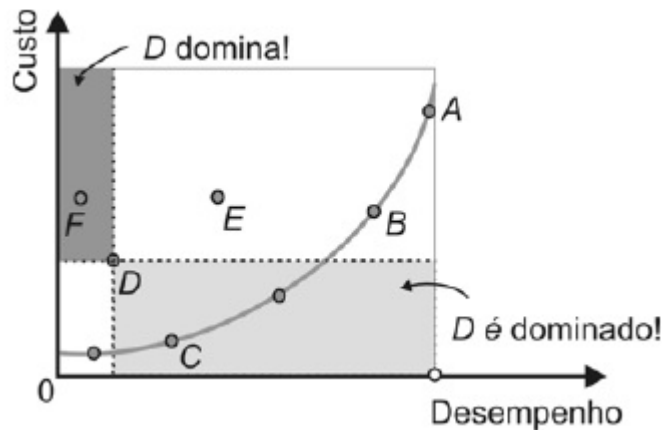
Figura A.1: Comparação de vetores em duas variáveis



Fonte: Ávila (2006)

Na figura (A.2) abaixo, verifica-se o conceito de dominância entre os pontos no problema multi-objetivo envolvendo maximização de desempenho e minimização de custos.

Figura A.2: Conceito de dominância



Fonte: Ávila (2006)

O ponto D apresenta uma solução melhor do que a apresentada pelo ponto F, tendo menor custo e maior desempenho ($D > F$). Comparando os pontos F e E, observa-se que E é melhor do que F ($E > F$), pois tem o mesmo custo e gera um desempenho melhor. No entanto, quando compara-se as soluções apresentadas pelos pontos C e A, não se pode definir qual é a melhor, pois A tem mais desempenho, mas C menor custo ($A \not> C$ e $C \not> A$). Para interpretar essas diferentes situações, pode-se utilizar o conceito de dominância de Pareto. Assim, para quaisquer dois vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$:

- $\vec{a} \succ \vec{b}$ ($\vec{a}$ domina $\vec{b}$) se e somente se $\vec{f}(\vec{a}) > \vec{f}(\vec{b})$

- $\vec{a} \succeq \vec{b}$ ($\vec{a}$ domina fracamente $\vec{b}$) se e somente se $\vec{f}(\vec{a}) \geq \vec{f}(\vec{b})$
- $\vec{a} \sim \vec{b}$ ($\vec{a}$ é indiferente de $\vec{b}$) se e somente se $\vec{f}(\vec{a}) \not\geq \vec{f}(\vec{b}) \wedge \vec{f}(\vec{b}) \not\geq \vec{f}(\vec{a})$

Para o exemplo do POM de maximização de desempenho e minimização de custo, representado pelas Figuras (A.1) e (A.2), a solução desempenho máximo e custo mínimo é irreal quando os objetivos são conflitantes. Na Figura (A.2) o retângulo cinza escuro destaca a região no espaço de objetivos que é dominada pelo vetor de parâmetros representado por D. Qualquer solução estando dentro do retângulo cinza claro domina a solução representada por D. Para soluções fora destes retângulos, D é indiferente.

Definição A.13 (Solução fracamente eficiente). *Uma solução $\hat{x}$ é fracamente eficiente se não existe $x \in \mathcal{X}$ de modo que $f_k(x) < f_k(\hat{x})$ para todo $k = 1, \dots, r$.*

Definição A.14 (Ponto fracamente não dominado). *Um ponto $\hat{z}$ no espaço de critério é fracamente não dominado se sua imagem inversa é uma solução fracamente eficiente, ou seja, $\hat{z} = f(\hat{x})$*

Definição A.15 (Solução localmente eficiente). *Uma solução $x^* \in \mathcal{X}$ é localmente eficiente se existe um $\epsilon > 0$ tal que x^* é eficiente em $\mathcal{X} \cap B(x^*, \epsilon)$, onde $B(x^*, \epsilon)$ é a bola centrada em x^* de raio ϵ*

Definição A.16 (Solução globalmente eficiente). *Uma solução $x^* \in \mathcal{X}$ é globalmente eficiente quando ela é eficiente em $\mathcal{X}$*

A fronteira de Pareto localmente ou globalmente eficiente é a imagem de todas as soluções localmente ou globalmente eficientes.

Definição A.17 (Soluções e pontos suportados). *Uma solução $x^* \in \mathcal{X}^*$ é eficiente e suportada, se existe algum $w = (w_1, \dots, w_r)^T > 0$ da forma que x^* seja solução do problema escalar:*

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } z = w^T f(x) \\ & \text{sujeito a } x \in \mathcal{X} \end{aligned} \tag{A.4}$$

o vetor objetivo resultante $z^ = f(x^*)$ é um ponto suportado pois, se não, x^* e z^* são chamados de solução eficiente não suportada e ponto não suportado, respectivamente.*

Definição A.18 (Vetor nadir). *O vetor $z^N \in \mathcal{Z}$ é chamado de nadir e sua k -ésima componente é o maior valor da função objetivo k no conjunto eficiente.*

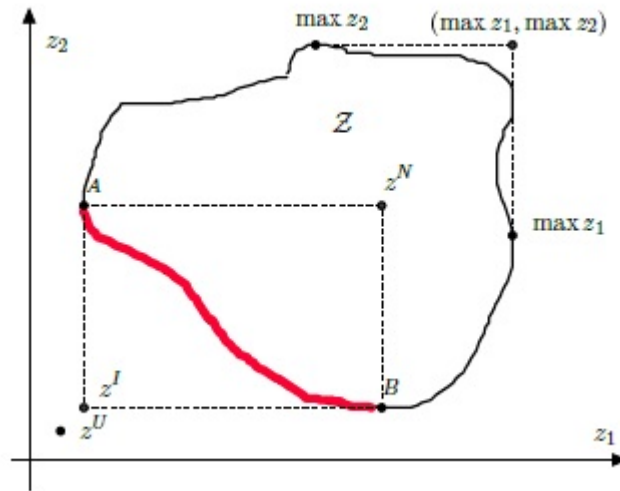
Para um problema multiobjetivo em que $r = 2$ (r é o índice de notação das r funções z_r) é possível determinar o vetor nadir, usando-se o seguinte teorema provado em (BEENSON, 1971).

Teorema A.1. *Dado um problema de otimização multiobjetivo em que $r = 2$, no conjunto das soluções eficientes, o valor mínimo de uma função objetivo é o valor máximo da outra e vice-versa.*

Estes pontos são chamados de *end-points* ou lexicográficos da fronteira de Pareto. Assim, $z^{*1} = (f_1(x^{*1}), f_2(x^{*1}))^T = (z_1^-, z_2^+)^T$ e $z^{*2} = (f_1(x^{*2}), f_2(x^{*2}))^T = (z_1^+, z_2^-)^T$ onde x^{*k} é o ótimo do objetivo $k = 1, 2$. E, portanto, $z^I = (z_1^-, z_2^-)^T$ e $z^N = (z_1^+, z_2^+)^T$.

A Figura (A.3) mostra a fronteira de Pareto em que pode ser observado o vetor nadir, vetor utópico, vetor ideal, bem como, as soluções lexicográficas representadas pelos pontos A e B.

Figura A.3: Pontos notáveis de um problema multiobjetivo ($r = 2$)



Fonte: Aliano Filho (2016)