

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROGRAMAÇÃO DAS FRENTES DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA
MODELAGEM VISANDO O EQUILÍBRIO DAS CAPACIDADES DE COLHEITA E
TRANSPORTE**

ROGÉRIO DE ÁVILA RIBEIRO JUNQUEIRA

TESE DE DOUTORADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROGRAMAÇÃO DAS FRENTES DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA
MODELAGEM VISANDO O EQUILÍBRIO DAS CAPACIDADES DE COLHEITA E
TRANSPORTE**

Rogério de Ávila Ribeiro Junqueira

**Tese de Doutorado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de São
Carlos, como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia
de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

São Carlos

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

J95pf

Junqueira, Rogério de Ávila Ribeiro.

Programação das frentes de colheita de cana-de-açúcar :
uma modelagem visando o equilíbrio das capacidades de
colheita e transporte / Rogério de Ávila Ribeiro Junqueira. --
São Carlos : UFSCar, 2014.

236 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2014.

1. Programação da produção. 2. Planejamento da
produção. 3. Cana-de-açúcar - colheita. 4. Sequenciamento
da produção. 5. Programação inteira mista. I. Título.

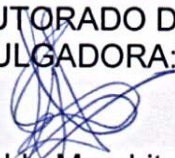
CDD: 658.53 (20^a)

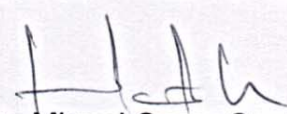



FOLHA DE APROVAÇÃO

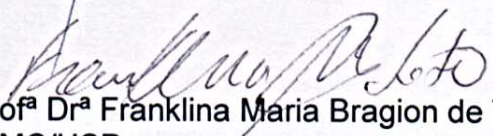
Aluno(a): Rogério de Ávila Ribeiro Junqueira

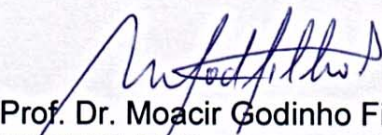
TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 09/06/2014 PELA
COMISSÃO JULGADORA:

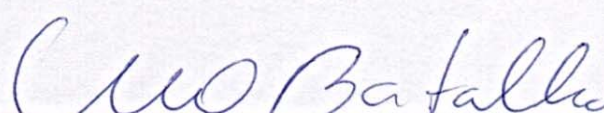

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
Orientador(a) PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Miguel Cezar Santoro
POLI/USP


Prof. Dr. João Alexandre Widmer
EESC/USP


Profª Drª Franklina Maria Bragion de Toledo
ICMC/USP


Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
PPGEP/UFSCar


Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE/UFSCar

Dedico esta tese aos meus queridos pais

*Luiz Antonio e Analice
e à minha amada esposa*

Michele.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mostrar sempre um caminho de luz nos momentos de dúvida e por prover fortaleza na superação de obstáculos na arte de pesquisar. Ao prof. Reinaldo pela confiança, pela orientação na elaboração desta pesquisa, pelo guia ao desvendar as ferramentas da pesquisa operacional desde o mestrado e pela pessoa amiga, íntegra e dedicada. À LogTrac Consultores Associados, por acreditar em meu crescimento profissional e pessoal por meio da pesquisa acadêmica, financiando, apoiando e incentivando este trabalho. Aos membros do Grupo de Pesquisa Operacional, em especial Douglas, Kléber, Leonardo, Marina, Tamara e Vinícius, que ajudaram nas dúvidas sobre conceitos e ferramentas, bem como possibilitaram a execução de testes remotos, muito importantes para a conclusão desta pesquisa. Aos demais professores e funcionários do DEP, que complementaram minha formação preparando-me para a conclusão do processo do doutorado e lutando pela manutenção do ensino, pesquisa e extensão de qualidade na UFSCar. Ao prof. Alysson pelas importantes contribuições a este trabalho. À Michele pela ajuda na revisão do texto. Ao prof. Artur, pela base em pesquisa e em modelagem matemática proporcionada pela iniciação científica. À prof^a. Vitória, pelos primeiros contatos na área de pesquisa operacional durante o trabalho de graduação. Ao prof. Moacir Scarpelli (*in memoriam*), fundamental para que eu pensasse em pós-graduação e com quem aprendi muito sobre sistemas produtivos. Ao Raimundo, Kamyro e Jonas por disponibilizarem seu tempo e possibilitarem um dos estudos de caso deste trabalho. Ao Adriano, Jonnyr, Raimundo e Ronan por responderem gentilmente ao questionário enviado, fundamentais para a validação deste trabalho. Ao Raimundo, ao João e aos amigos da LogTrac pela ajuda e pelo estímulo para concluir este trabalho. Aos amigos Marco Aurélio e Ricardo, pelo companheirismo e incentivo desde cedo. Aos amigos Eduardo, Guilherme, Juliano, Luciano, Luís Francisco, Márcio e Murilo pelo companheirismo, incentivo e bons anos em São Carlos. Aos meus pais, Luiz Antonio e Analice, por nos prepararem para a vida valorizando o ser e o saber, além do apoio incondicional. Aos meus irmãos & cunhados (as): Cássia & Herbet e Thadeu & Daniela, pelo companheirismo, pela solidariedade e pelo incentivo em todas as horas. Às minhas avós Marita (*in memoriam*) e Lourdes (*in memoriam*) e Tia Zinha (*in memoriam*), pelos exemplos de vida. Ao Léo, por estar ao

meu lado, desde antes de nascer. Ao Tio Sérgio, meu primeiro incentivador à pesquisa, grande apoiador em momentos de crise e com quem tive a honra de ter boas discussões sobre este trabalho. Aos meus familiares que participaram de cada etapa de minha formação apoiando e incentivando. À Michele, minha companheira de todas as horas, que ajuda a tornar os momentos difíceis mais leves e os de conquista mais ternos.

Resumo

A produção de açúcar, álcool e energia elétrica a partir de cana-de-açúcar passa necessariamente pela colheita e transporte da matéria-prima, que são operações custosas, complexas e que interferem significativamente na qualidade da matéria-prima industrial. A literatura reporta várias abordagens de otimização relacionadas ao planejamento do plantio, da colheita e do transporte de cana-de-açúcar, todavia a programação das frentes de colheita é pouco explorada. Nesta tese pretende-se contribuir para o estado da arte deste importante tema no contexto do agronegócio brasileiro. Propõe-se abordagens de otimização para apoiar decisões de programação das frentes de colheita, considerando-se o equilíbrio das capacidades de colheita e transporte, bem como um bom manejo agrônomico. As abordagens são inspiradas na representação do problema por meio de um modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção em máquinas paralelas com custos e tempos de *setup* dependentes da sequência, bem estudado na literatura em contextos de planejamento e controle da produção. Para isso foram desenvolvidas três variantes desta formulação baseadas em programação matemática, voltadas para a programação das frentes de colheita, que foram testadas em dois estudos de caso reais de usinas de cana-de-açúcar de médio porte do setor. Métodos heurísticos baseados em procedimentos de agregação e programação matemática também foram estudados e desenvolvidos para a resolução dos problemas de grande porte encontrados na prática. Das três variantes estudadas, uma delas apresentou melhor qualidade da solução dentro de tempos computacionais aceitáveis para o problema. Análises de cenário importantes foram feitas indicando que o cumprimento da programação proporciona redução de complexidade da colheita e transporte na safra seguinte, podendo gerar economias significativas nos casos estudados. Além disso, a comparação dos resultados das abordagens aqui exploradas com o que é praticado no setor indica um potencial de redução de custos também significativo para os casos estudados. Os resultados foram analisados de acordo com uma metodologia de validação (faceta descritiva do tetraedro) conhecida na literatura.

Palavras chave: Planejamento de colheita de cana-de-açúcar, Roteamento de veículos, Sequenciamento de máquinas, Programação inteira mista, Heurística, *Relax-and-fix*, *Fix-and-optimize*.

Abstract

The production of sugar, ethanol and electricity from sugar cane necessarily involves harvesting and transportation of raw materials, which are expensive and complex operations and have significant influence on the quality of the industrial raw material. The literature reports several optimization approaches related to the planning of planting, harvesting and transporting of sugarcane, however the scheduling of harvesting fronts is underexplored. This thesis intends to contribute to the state-of-art of this important issue in the context of the Brazilian agribusiness. Optimization approaches to support scheduling decisions of harvesting fronts considering the balance of harvesting and transportation capacities, as well as good agronomic management are proposed. The approaches are inspired by the representation of the problem as a lot sizing and scheduling model with parallel machines and sequence-dependent *setup* costs and times, a modelling technique well studied in the production planning and control literature. Three variants of this formulation, based on mathematical programming models, were developed and tested in two real case studies of medium size sugar mills. Heuristic methods based on aggregation procedures and mathematical programming have also been studied and developed to solve large scaled problems found in practice. Among the three variants studied, one presented the best solution quality within the expected execution time. Important scenario analysis were done indicating that the schedule's fulfilment provides reduction of harvesting and transporting complexity to the following season, which can generate significant saves in the cases studied. Besides that, comparing the proposed scheduling method with one of the sector's practice, it can be generated also significant cost reduction in the cases studied. The results were analyzed according to a validation methodology (descriptive facet of tetraedrum) well known in the literature.

Keywords: Sugar cane harvest planning, vehicle routing problem, Lot-sizing and scheduling problem, Mixed integer programming, Heuristics, Relax-and-fix, Fix-and-optimize.

Lista de Figuras

Figura 1: Elementos do objeto de estudo	4
Figura 2: Modelo de resolução de problemas	9
Figura 3: Recorte da cadeia de suprimentos	17
Figura 4: (a) Carregamento com corte manual. (b) Carregamento com corte mecanizado	20
Figura 5: Operação da colhedora	21
Figura 6: Etapas do ciclo do caminhão canavieiro	22
Figura 7: Tecnologias de transporte utilizadas no transporte de cana-de-açúcar	24
Figura 8: Curva de maturação da cana-de-açúcar	27
Figura 9: Tomada de decisão na cadeia sucroenergética	33
Figura 10: Tetraedro para a validação de modelos	78
Figura 11: Relacionamento entre macro e microperíodos	82
Figura 12: Método heurístico proposto	114
Figura 13: Definição do bloco agregado	115
Figura 14: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> temporal <i>forward</i>	117
Figura 15: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> temporal <i>backward</i>	117
Figura 16: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> por frente de colheita	118
Figura 17: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> temporal e por frente de colheita	119
Figura 18: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> temporal <i>forward</i> e <i>backward</i>	119
Figura 19: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> temporal <i>forward</i> com <i>overlapping</i>	120
Figura 20: Algoritmo <i>relax-and-fix</i> blocos <i>forward</i> com <i>overlapping</i>	121
Figura 21: Algoritmo <i>fix-and-optimize</i> temporal <i>forward</i> com <i>overlapping</i>	122
Figura 22: Experimentos utilizados para os Modelos 1 e 1A	136
Figura 23: Tetraedro para a validação de modelos	179

Lista de Tabelas

Tabela 1: Número de publicações por país e ano	38
Tabela 2: Número de publicações por revista ou instituição de pesquisa	39
Tabela 3: Modelos de planejamento e controle	53
Tabela 4: Índices e conjuntos do modelo	82
Tabela 5: Parâmetros do modelo	84
Tabela 6: Variáveis de decisão do modelo	85
Tabela 7: Fator ponderador γ_{jt} pertencente à função objetivo	86
Tabela 8: Parâmetros adicionais envolvidos	91
Tabela 9: Variáveis de decisão adicionais	91
Tabela 10: Parâmetros dos blocos de colheita	95
Tabela 11: Rendimentos de colheita	96
Tabela 12: Distância e tempo de deslocamento entre os blocos	97
Tabela 13: Conjunto dos períodos permitidos para a colheita e melhores momentos de colheita dentro da janela de tempo	98
Tabela 14: Custos de ociosidade de colheita por hora	99
Tabela 15: Custos de ociosidade de transporte por hora	99
Tabela 16: Valores de γ_{jt} para os experimentos 1.2 e 1.3	102
Tabela 17: Comparação de resultados dos modelos propostos	108
Tabela 18: Padrões de período (I A1)	125
Tabela 19: Estatística descritiva das características dos blocos agregados (I A1)	127
Tabela 20: Definição de parâmetros por macroperíodo (I A1)	133
Tabela 21: Balanceamento preliminar (I A1)	133
Tabela 22: Lista de instâncias e suas características	137
Tabela 23: Experimentos computacionais com o Modelo 1B (M 1B, I A1)	143
Tabela 24: Análise da moagem (M 1B, E 4, I A1)	144
Tabela 25: Análise da capacidade (M 1B, E 4, I A1)	145
Tabela 26: Análise da capacidade de frentes de colheita (M 1B, E 4, I A1)	146
Tabela 27: Análise de mudança de área das frentes (M 1B, E 4, I A1)	147
Tabela 28: Estatística descritiva das características dos blocos agregados (I A4)	152
Tabela 29: Análise da capacidade (M 1B, E 21, I A4)	153
Tabela 30: Análise da capacidade (M 1B, E 22, I A5)	154
Tabela 31: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 22, I A5)	155

Tabela 32: Análise da moagem (M 1B, E 23, I A6)	155
Tabela 33: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 23, I A6)	156
Tabela 34: Análise da capacidade (M 1B, E 24, I A7)	158
Tabela 35: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 24, I A7)	158
Tabela 36: Análise da capacidade (M 1B, E 25, I A8)	159
Tabela 37: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 25, I A8)	159
Tabela 38: Análise da capacidade (M 1B, E 26, I A10)	160
Tabela 39: Análise da moagem (M 1B, E 28, I A11)	162
Tabela 40: Análise da capacidade (M 1B, E 28, I A11)	162
Tabela 41: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 28, I A11)	163
Tabela 42: Análise da capacidade (M 1B, E 29, I A12)	163
Tabela 43: Padrões de período (I B1)	166
Tabela 44: Estatística descritiva das características dos blocos agregados (I B1)	168
Tabela 45: Definição de parâmetros por macroperíodo (I B1)	174
Tabela 46: Balanceamento preliminar da colheita manual (I B1)	175
Tabela 47: Balanceamento preliminar da colheita mecanizada (I B1)	175
Tabela 48: Experimentos computacionais com o Modelo 1B (M 1B, I B1)	177
Tabela 49: Apresentação da resposta dos questionários	184
Tabela 50: Avaliação do valor desejado de z_{ij}	219
Tabela 51: Avaliação de u_{ij} .de acordo com as restrições (131) e (132)	219
Tabela 52: Avaliação de v_{ij} .de acordo com as restrições (133) e (134)	219
Tabela 53: Avaliação de z_{ij} .de acordo com as restrições (135), (136) e (137)	220

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Posicionamento dos blocos e usina	97
Gráfico 2: Movimento das frentes: Exp. 1.1	101
Gráfico 3: Movimento das frentes: (a) Exp. 1.2, (b) Exp. 1.3	102
Gráfico 4: Movimento das frentes: (a) Exp. 1.4, (b) Exp. 1.5	103
Gráfico 5: Movimento das frentes: (a) Exp. 1.4', (b) Exp. 1.5'	104
Gráfico 6: Movimento das frentes (a) Exp. 1A.1 (b) Exp. 1A.2	106
Gráfico 7: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.1, (b) Exp. 1B.2	107
Gráfico 8: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.3, (b) Exp. 1B.4, (c) Exp. 1B.5	109
Gráfico 9: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.3, (b) Exp. 1B.6, (c) Exp. 1B.7	110
Gráfico 10: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.6, (b) Exp. 1B.8, (c) Exp. 1B.9	111
Gráfico 11: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.5, (b) Exp. 1B.10, (c) Exp. 1B.11	112
Gráfico 12: Distribuição geográfica dos blocos de colheita (I A1)	126
Gráfico 13: Histograma do tamanho do bloco de colheita agregado (I A1)	128
Gráfico 14: Histograma do potencial de (a) colheita (b) transporte (I A1)	129
Gráfico 15: Histograma do tempo de permanência das frentes (I A1)	130
Gráfico 16: Histograma da distância de deslocamento entre os blocos (I A1)	131
Gráfico 17: Histograma do tempo de deslocamento entre os blocos (I A1)	132
Gráfico 18: Função objetivo x Tempo de execução (M 1B, I A1)	141
Gráfico 19: Distribuição geográfica dos blocos de colheita por frente (M 1B, E 4, I A1)	148
Gráfico 20: Sequenciamento da frente 1 (M 1B, E 4, I A1)	148
Gráfico 21: Sequenciamento da frente 2 (M 1B, E 4, I A1)	149
Gráfico 22: Sequenciamento da frente 3 (M 1B, E 4, I A1)	149
Gráfico 23: Sequenciamento da frente 4 (M 1B, E 4, I A1)	150
Gráfico 24: Sequenciamento da frente 5 (M 1B, E 4, I A1)	150
Gráfico 25: Histograma do tempo de permanência das frentes (I A4)	153
Gráfico 26: Distribuição geográfica dos blocos de colheita (I B1)	167
Gráfico 27: Histograma do tamanho do bloco de colheita manual (I B1)	169
Gráfico 28: Histograma do tamanho do bloco de colheita mecanizada (I B1)	169
Gráfico 29: Histograma do potencial de colheita mecanizada (I B1)	170
Gráfico 30: Histograma do potencial de transporte: (a) manual, (b) mecanizado (I B1)	171
Gráfico 31: Histograma do tempo de permanência das frentes: (a) manuais, (b) mecanizadas (I B1)	172

Gráfico 32: Histograma da distância de deslocamento entre os blocos (I B1)	173
Gráfico 33: Histograma do tempo de deslocamento entre os blocos (I B1)	174
Gráfico 34: Tempos de processamento dos blocos pelas frentes	217

Lista de Abreviaturas e Siglas

ART	Açúcares Redutores Totais
CLSP	<i>Capacitated Lot Size Problem</i>
CONSECANA	Conselho de Produtores de cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo
CSLP	<i>Continuous Setup Lot-sizing Problem</i>
DLSP	<i>Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem</i>
DSS	<i>Decision Support Systems</i>
ELSP	<i>Economic Lot Scheduling Problem</i>
EOQ	<i>Economic Quantity Order</i>
FP	<i>Feasibility Pump</i>
Gap	Gap de otimalidade
GAP	<i>Generalized Assignment Problem</i>
GLSP	<i>General Lot-sizing and Scheduling Problem</i>
GLSP-CS	<i>General Lot-sizing and Scheduling Problem with Conservation of Setup State</i>
GLSP-LS	<i>General Lot-sizing and Scheduling Problem with Loss of Setup State</i>
GLSPPL	<i>General Lot-sizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines</i>
JIT	<i>Just in Time</i>
LB	<i>Local Branching</i>
LSP	<i>Lot sizing and Scheduling Models</i>
LSPSD	<i>Lotsizing and Scheduling Problem with Sequence-Dependent setup cost and times</i>
MIP	Modelo de Programação Matemática Inteira Mista
MLLP	<i>Multilevel Lotsizing Problem</i>
MRP	<i>Materials Requirement Planning</i>
ORPLANA	Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil
PIB	Produto Interno Bruto
PLSP	<i>Proportional Lot-sizing and Scheduling Problem</i>
PUI	Período Útil de Industrialização
RINS	<i>Relaxation Induced Neighborhood Search</i>
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Window</i>

VRPTWSD *Vehicle Routing Problem with Time Window and Split Delivery*
WW *Problema de Wagner-Whitin*
WWCC *Wagner Whitin with Change-Over*
WWJR *Wagner Whitin with Joint Replenishment Costs*
WWS *Wagner Whitin with Stochastic Demands*

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos e relevância.....	7
1.2	Método de pesquisa.....	8
1.3	Organização da tese.....	10
2	Definição do problema e seu ambiente.....	13
2.1	Conceitos de planejamento da produção.....	13
2.1.1	Planejamento hierárquico.....	13
2.1.2	Dimensionamento de lotes.....	15
2.1.3	Sequenciamento da produção.....	16
2.2	Cadeia de suprimentos.....	16
2.2.1	Tipos de relacionamentos no sistema agroindustrial.....	18
2.2.2	Contexto operacional das usinas.....	19
2.2.3	Processo de colheita.....	19
2.2.4	Processo de transporte.....	22
2.3	Período de utilização industrial.....	25
2.4	Setorização das frentes de colheita.....	28
2.5	Outros fatores logísticos.....	28
2.5.1	Flutuações na capacidade de processamento da indústria.....	28
2.5.2	Comportamento da entrega de fornecedores.....	29
2.5.3	Liberação de área de vinhaça.....	30
2.5.4	Áreas de risco de incêndio.....	30
2.5.5	Áreas de risco de inundação.....	31
2.5.6	Áreas de solo com baixa capacidade de retenção de água.....	31
2.5.7	Trafegabilidade das estradas.....	31
2.6	Tomada de decisão na cadeia sucroenergética.....	32
2.7	Modelo conceitual do problema.....	35
3	Revisão da literatura e fundamentação teórica.....	37
3.1	Modelos de planejamento e controle em usinas de cana-de-açúcar.....	37
3.1.1	Planejamento industrial e distribuição física.....	40
3.1.2	Desenho da infraestrutura de colheita.....	41
3.1.3	Avaliação de cenários de colheita e transporte utilizando simulação.....	42
3.1.4	Sequenciamento e despacho de veículos.....	43
3.1.5	Formação de blocos de colheita.....	44
3.1.6	Planejamento plurianual (implantação/reforma).....	44
3.1.7	Planejamento de plantio.....	46
3.1.8	Planejamento de colheita macro.....	47

3.1.9	Planejamento operacional de colheita.....	50
3.1.10	<i>Softwares</i> de mercado	51
3.1.11	Lacuna na literatura	53
3.2	O problema de roteamento de veículos (VRP).....	57
3.3	O problema do dimensionamento e sequenciamento de lotes	57
3.3.1	Evolução do LSP	58
3.3.2	Métodos de solução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes.....	67
3.4	Validação dos modelos	75
4	Modelo matemático e método de solução	81
4.1	Modelagem do problema	81
4.1.1	Desenvolvimento do modelo matemático	82
4.1.2	Experimentos com o problema teste.....	94
4.1.3	Considerações sobre os modelos propostos	112
4.2	Métodos de solução propostos	114
4.2.1	Agregação de blocos	114
4.2.2	Heurística de construção	116
4.2.3	Heurística de melhoria	121
4.2.4	Considerações sobre os métodos de solução propostos.....	122
5	Aplicações dos modelos matemáticos.....	123
5.1	Empresa A.....	123
5.1.1	Agregação de blocos.....	124
5.1.2	Dados de entrada.....	127
5.1.3	Implementação computacional e análise dos experimentos.....	133
5.1.4	Análise da solução obtida.....	144
5.1.5	Análise de cenários	151
5.2	Empresa B	165
5.2.1	Agregação dos blocos	166
5.2.2	Dados de entrada.....	168
5.2.3	Implementação computacional e experimentos.....	175
5.3	Comparação dos estudos de caso	178
6	Processo de validação.....	179
6.1	Validação conceitual.....	180
6.2	Validação lógica	185
6.3	Validação de aptidão.....	185
6.4	Validação de dados.....	186
6.5	Considerações sobre o processo de validação.....	188

7	Conclusões e propostas de extensão da pesquisa.....	189
7.1	Conclusões	189
7.2	Propostas de extensão da pesquisa	192
	Referências Bibliográficas	195
	Apêndices	211
	Apêndice A: Revisão da literatura de VRP.....	211
	Problema do caixeiro viajante TSP (<i>Traveling Salesman Problem</i>)	211
	VRP clássico.....	212
	VRP com janelas de tempo.....	213
	VRP com entrega fracionada.....	215
	Métodos de solução do VRP	216
	Apêndice B: Modelo proposto baseado no VRPSDTW	217
	Apêndice C: Dados dos blocos agregados.....	221
	Instância A1	221
	Instância B1	223
	Apêndice D: Questionário para especialistas em planejamento.....	227
	Apêndice E: Resposta do questionário	231

1 Introdução

A substituição do petróleo por produtos renováveis na base da matriz energética é um movimento mundial e, em especial no Brasil, cuja aptidão e o conhecimento técnico no complexo canavieiro são relevantes. Esta substituição é possível tanto com base na substituição da gasolina por etanol, revitalizada com o surgimento dos carros com tecnologia de combustível *flex*, quanto com a geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar, com potencial de produção de energia equivalente a 1,5 hidrelétricas de Itaipu (UNICA, 2009).

Em estudo encomendado pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), estima-se que o Produto Interno Bruto (PIB) do setor sucroenergético na safra de 2008 foi cerca de US\$28 bilhões, sendo a produção de cana-de-açúcar responsável por US\$11,5 bilhões da receita bruta (MARKESTRAT, 2009). Quando se compara a produção de energia a partir da cana-de-açúcar à de derivados de petróleo, o estudo mostra um papel importante do setor sucroenergético no equilíbrio da distribuição regional dos empregos, pois a riqueza é gerada no interior dos estados produtores. Também existem benefícios no combate do aquecimento global, uma vez que há uma redução de 89% na emissão de CO₂ no ciclo baseado na cana-de-açúcar crua, ou seja, sem queima (UNICA, 2009). Para que o processo de colheita da cana queimada seja convertido em colheita de cana crua, a mecanização da colheita vem aumentando gradualmente, em paralelo à adequação das técnicas de preparo e conservação do solo. No estado de São Paulo, de acordo com a Lei Estadual nº 11.241 de 19 de setembro de 2002 que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da cana-de-açúcar e dá outras providências, é prevista uma redução da queima da palha da cana para 20% das áreas mecanizadas em 2016 e deve ser extinta em 2021. Um protocolo assinado entre o estado de São Paulo e a Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA) antecipa a eliminação total das áreas mecanizáveis (inclinação inferior a 12% e/ou área superior a 150 ha) para 2014 e das demais para 2017 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2008). Além disso, há vários municípios que já proíbem a queima da palha dentro de seus limites ou que a proíbem durante épocas com níveis de umidade do ar críticos.

Embora haja grande valor agregado na etapa industrial, aproximadamente 60% dos custos de produção da tonelada de cana se concentram na etapa agrícola, conforme dados da safra 2010/2011 coletados em PECEGE (2011) de uma amostra de usinas da região Centro-Sul de áreas tradicionais e de expansão nos últimos anos. Este estudo também mostra uma série comparativa de custo total *versus* receita de quatro safras consecutivas, sendo que

apenas na última (2010/2011) conseguiram-se margens positivas. Nas outras safras, a receita das unidades agrícolas não pagava os custos de remuneração da terra e do capital investido. Em anos recentes mais críticos, como as safras de 2007/2008 e 2008/2009, não foi possível pagar o custo operacional, que inclui as depreciações de formação da lavoura, máquinas e infraestruturas, bem como a remuneração do fornecedor de cana.

Apesar da perspectiva de aumento da atratividade do setor, ilustrada pela entrada de grandes empresas multinacionais, a produção agrícola é caracterizada, a exemplo de outros setores agroindustriais produtores de *commodities*, por baixas margens e alta incerteza dada sua vulnerabilidade às condições climáticas e biológicas (AHUMADA e VILLALOBOS, 2009). Para a empresa agrícola canavieira obter lucratividade, cabe aos gestores buscarem de um lado a excelência operacional, baixando custos e mantendo os padrões de qualidade, e de outro, a maximização da recuperação de açúcares por unidade de área, por meio de boas práticas de manejo da lavoura (SOUZA, 2001).

Assim, um dos focos para redução de custos significativa na produção agrícola é a colheita, correspondendo a cerca de 40% do custo total para áreas tradicionais de usinas na safra 2010/2011 (PECEGE, 2011). A colheita determina a regularidade e qualidade do suprimento de cana-de-açúcar à unidade fabril, que envolve um sistema logístico complexo. A operação eficiente desse sistema necessita do uso de ferramentas de planejamento e controle integradas, conciliadas com técnicas agrônômicas para proporcionar um bom aproveitamento dos açúcares da planta.

Um dos componentes de complexidade deste sistema logístico, abordado neste trabalho, é a divisão do esforço de colheita em várias frentes de trabalho (HAHN; RIBEIRO, 1999). Assim, a frente de colheita é uma equipe de trabalho que opera equipamentos produtivos, como colhedora de cana e trator ou caminhão de transbordo, e que pode ter estruturas de abastecimento, manutenção e socorro (bombeiro) dedicados, com o objetivo de colher cana e carregar as unidades de carga para transporte. De acordo com Souza (2001), a frente de colheita pode ser vista como uma célula de produção.

Essa divisão em frentes se justifica, pois possibilita à frente manter uma capacidade de transporte média, conforme as frentes vão mudando de bloco de colheita, que consiste em um agrupamento de áreas próximas, espacialmente, a serem colhidas em uma mesma época. A manutenção desta capacidade de transporte média seria inviável caso todo o esforço estivesse concentrado em apenas um ponto, pois ora os recursos estariam em excesso, quando a frente única estivesse próxima da usina, ora estariam em falta, quando estivesse distante.

Da mesma forma que a distância ou tempo de ciclo influenciam o transporte, as diferentes características dos blocos em termos de ambiente de produção, declividade e sistematização, em combinação com a variedade de cana, determinam as capacidades de colheita, especialmente quando é mecanizada. Uma premissa deste trabalho é que um bom planejamento de colheita consiga manter uniformes as capacidades de colheita e de transporte durante as mudanças de área das frentes de colheita, para manter aproximadamente constantes os recursos de colheita e transporte ao longo da safra.

Neste planejamento, a cana-de-açúcar também deve ser colhida na idade e época que maximizem a recuperação de açúcares da variedade plantada no ambiente de produção, visando não comprometer os padrões de qualidade. Entretanto, a busca desregrada pela maximização do teor de açúcares pode ocasionar períodos de pico de necessidade de equipamentos de colheita e transporte. Se não houver disponibilidade de equipamentos no período de pico, haverá falhas no suprimento de matéria-prima, resultando em altos custos à unidade fabril (KULLAPAPRUK *et al.*, 2009).

Outra variável associada ao planejamento é a reforma do canavial. A cana-de-açúcar permite vários cortes a partir de um mesmo plantio, mas, normalmente, a planta perde produtividade a cada corte, influenciada pelos tratos culturais, pela fertilidade do solo, pela época de colheita e pela variedade plantada. Assim, para manter o suprimento da unidade fabril na safra, é necessário que parte do canavial seja replantada, ou seja, “reformada” de acordo com o jargão do setor (BARATA, 1992).

Algumas ferramentas computacionais disponíveis no mercado e apresentadas na literatura focam os seguintes modelos de planejamento e controle: o planejamento de reforma do canavial (BARATA, 1992; HIGGINS, 1999), o planejamento de plantio (SARTORI *et al.*, 2001), de colheita na safra (BARATA, 1992; GRUNOW *et al.* 2007; JENA; POGGI, 2013) e operacional (GRUNOW *et al.*, 2007; JENA; POGGI, 2013), bem como o controle de tráfego (HAHN; RIBEIRO, 1999). Nesta hierarquia, as ferramentas que apoiam decisões com o horizonte de tempo maior servem de condição de contorno às de horizonte mais curto.

Entretanto, entre o planejamento da reforma e do plantio, percebe-se uma lacuna em que, da parte da reforma, observa-se uma preocupação com o rendimento da planta ao longo dos estágios de corte e, da parte do plantio, uma preocupação com a seleção da variedade para determinado ambiente de produção. Embora no caso do planejamento da reforma as capacidades de colheita e transporte sejam abordadas, esta abordagem parte da definição das áreas das frentes de colheita previamente estabelecidas (setorização das frentes).

A literatura trata as restrições de capacidade de transporte e colheita de maneira simplificada, considerando o potencial de cada área de maneira agregada por frente ao invés de individualizados. No caso do transporte, trabalhos como Grunow *et al.* (2007) consideram apenas a distância média da frente de colheita, desprezando as velocidades de deslocamento, bem como a capacidade de transporte do veículo. Já na colheita, não são consideradas condições como a produtividade e sistematização das áreas, relevantes para a colheita mecanizada.

Pode-se pensar em uma analogia da programação das frentes de colheita com o conhecido problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Window*), abordado, por exemplo, em Solomon (1987), e encontrado na literatura para o caso do planejamento operacional de colheita de cana-de-açúcar em Jena e Poggi (2013). O VRP (*Vehicle Routing Problem*) em sua versão original (sem janelas de tempo) consiste em encontrar um conjunto de rotas com mínimo custo, reduzindo o deslocamento do veículo ou o número de veículos. Cada uma destas rotas sai de um depósito e retorna a ele, de tal forma que a demanda dos nós é atendida (LARSON; ODONI, 1981; BODIN *et al.*, 1983; SOLOMON, 1987; PAESSENS, 1988; LAPORTE, 1992; LAPORTE *et al.*, 2000; PISSINGER; ROPKE, 2007). No caso em estudo, pode-se fazer a seguinte analogia: os veículos equivalem às frentes de colheita, os nós são os blocos com cana-de-açúcar e a quantidade de cana de cada bloco é a demanda a ser atendida.

Jena e Poggi (2013), em sua aplicação ao planejamento de colheita operacional, transformaram o VRPTW em um problema de atribuição generalizado (GAP – *Generalized Assignment Problem*) para o caso multi-período e em mais de uma usina. Para o sequenciamento da frente de colheita, a possibilidade de sua produção servir a mais de uma unidade industrial pode trazer vantagens logísticas. Quando há unidades próximas entre si, o modelo pode indicar o momento em que as frentes realocam sua produção a outra usina coligada, de forma a reduzir o deslocamento da frente, mantendo o equilíbrio das capacidades de colheita e transporte.

Outro tipo de analogia que pode ser feita, e particularmente explorada nesta tese, é a associação do problema de programação das frentes de colheita ao problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes com linhas de produção em paralelo (GLSPPL – *General Lot-sizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines*) proposto por Meyr (2002) e estudado em outros trabalhos (ZHU; WILHELM, 2006; ALLAHVERDI *et al.*, 2008; CLARK, 2003; FERREIRA, 2007; BERARDI *et al.*, 2008; JÓZEFOWSKA; ZIMNIAK, 2008; MATEUS *et al.*, 2010; FERREIRA *et al.*, 2012). Neste caso a frente de

colheita pode ser vista como uma linha de produção, os itens produzidos seriam os blocos de colheita e o tempo de deslocamento da frente representaria o tempo de *setup* dependente da sequência de produção da linha. Convém ressaltar que modelos voltados ao planejamento de colheita baseados no GLSPPL não foram encontrados na literatura. Além disso, embora em parte do tempo desta pesquisa estivesse voltada para a analogia com o VRP, a analogia com o GLSPPL mostrou-se mais adequada, devido à forma com que permite tratar a discretização do tempo, bem como inserir mais de uma restrição de capacidade às frentes de colheita (linhas de produção), que seriam transporte e colheita.

O GLSPPL é uma generalização do problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes (GLSP – *General Lot-sizing and Scheduling Problem*), extensamente abordado na literatura com dependência ou independência de *setup* (FLEISCHMANN e MEYR, 1997; DREXL; KIMMS, 1997; MEYR, 2000; HAASE; KIMMS, 2000; ARAÚJO *et al.*, 2007 e 2008; FERREIRA *et al.*, 2009 e 2010; JANS; DEGRAEVE, 2008; ALLAHVERDI *et al.*, 2008; TOSO, 2008; TOSO *et al.*, 2009; CLARK *et al.*, 2010).

Além disso, a literatura do GLSPPL mostra casos bem sucedidos de métodos heurísticos baseados em programação matemática para resolver aplicações do GLSPPL em problemas de produção reais de grande porte, como, por exemplo, em Ferreira (2007) e Ferreira *et al.* (2009, 2010 e 2012) aplicados à indústria de bebidas, em Toso (2008), Toso *et al.* (2009) e Clark *et al.* (2010) aplicados à indústria de ração animal, em Araújo *et al.* (2008) aplicado a fornos de pequenas fundições e em Józefowska e Zimniak (2008) aplicado a uma fábrica de tubos plásticos.

Com exceção de Józefowska e Zimniak (2008), que utilizaram um algoritmo genético como método de solução, os demais trabalhos utilizaram heurísticas com base em programação matemática do tipo *relax-and-fix* (POCHET; WOLSEY, 2006; FISHETTI *et al.*, 2009). Neste tipo de heurística as variáveis de decisão inteiras são particionadas em conjuntos tratados de maneira distinta. Geralmente as variáveis de um desses conjuntos são tratadas como variáveis inteiras e as demais ou são relaxadas e tratadas linearmente ou recebem valores fixos. As variáveis tratadas como inteiras na iteração anterior são então fixadas na iteração atual, e um outro conjunto de variáveis tratadas linearmente na iteração anterior são tratadas como inteiras na atual, dependendo da estratégia utilizada. Desta forma, o porte do problema da programação inteira é reduzido ao se resolver iterativamente cada um dos subproblemas.

Outras técnicas heurísticas baseadas em programação matemática vêm sendo também utilizadas na literatura, como *fix-and-optimize* (SAHLING *et al.*, 2009; HELBER;

SAHLING, 2010; LANG; SHEN, 2011; SEEANNER *et al.*, 2013), em alguns casos juntamente com o *relax-and-fix*.

1.1 Objetivos e relevância

O objetivo principal desta tese é o estudo, desenvolvimento, teste, aplicação e análise de abordagens de otimização para a programação das frentes de colheita de cana-de-açúcar, visando apoiar as decisões de colheita, plantio e reforma dos blocos de colheita. Para atingir este objetivo, os seguintes objetivos específicos são pretendidos:

- ✓ Estender e adaptar o GLSPPL para o contexto da definição das áreas das frentes de colheita de cana-de-açúcar, incluindo aspectos relacionados à produção do bloco de colheita e faixa de moagem da usina, colheita em janelas de tempo, setorização das frentes quando necessário, capacidade de colheita e transporte no GLSPPL, entre outros.
- ✓ Desenvolver métodos de resolução do GLSPPL estendido para as especificidades do problema em questão, em particular, propondo procedimentos de agregação (para reduzir o tamanho do problema), construção de solução inicial e melhoria.
- ✓ Analisar a aplicação da abordagem desenvolvida em usinas de cana-de-açúcar, incluindo um processo de validação da mesma.

Esta abordagem de otimização, baseada em técnicas de pesquisa operacional, é aplicada a duas usinas de cana-de-açúcar típicas do setor para validação e avaliação do seu desempenho na prática, contando com a colaboração destas usinas para a disponibilização de dados e avaliações dos resultados obtidos. Convém notar que não foram encontrados outros estudos na literatura com esse enfoque. Esta proposta possui pontos importantes de originalidade no escopo do planejamento, na aplicação do GLSPPL no contexto do planejamento de colheita de cana-de-açúcar e também na consideração de restrições desse ambiente no GLSPPL, bem como na pesquisa de métodos de agregação, construção da solução inicial e melhoria para resolvê-lo. Acredita-se que estes pontos trazem contribuição para o estado da arte do tema e justificam o desenvolvimento de um projeto de doutorado, sendo detalhados a seguir.

Na prática das usinas, com o uso dessa abordagem de otimização, acredita-se que será possível reduzir os desvios entre plano e operação na colheita e no transporte de cana-de-açúcar, permitindo reduzir custos com falta de suprimento, bem como reduzir o superdimensionamento de recursos. A nova analogia na literatura entre o GLSPPL e a programação de frentes de colheita de cana-de-açúcar, considerando restrições de capacidade

de transporte e colheita, se mostra cada vez mais relevante dentro do contexto nacional de aumento da colheita de cana crua e consequente mecanização.

1.2 Método de pesquisa

A abordagem deste trabalho é quantitativa, baseada no método de modelagem analítica, uma vez que se propõe a desenvolver, testar e analisar modelos matemáticos de otimização que relacionam variáveis de controle a variáveis de desempenho (BERTRAND; FRANSOO, 2002). No caso deste trabalho, as variáveis de controle seriam o período e a frente que um bloco seria colhido e as variáveis de desempenho seriam o mínimo custo e/ou o mínimo deslocamento das frentes de colheita. Bertrand e Fransoo (2002) separam a pesquisa em modelagem em dois tipos: axiomática e empírica. No primeiro tipo as pesquisas tratam de problemas idealizados da literatura. No segundo, tratam de aplicações de problemas reais das empresas.

O tipo de modelagem utilizada neste trabalho é predominantemente empírico, pois o desenvolvimento do modelo é baseado em uma problemática do cotidiano das usinas. Além disso, os dados a serem utilizados são extraídos de situações reais. Entretanto, a parte da pesquisa quantitativa deste trabalho que trata de métodos de resoluções para o GLSPPL pode ser considerada axiomática por ser um problema razoavelmente idealizado e vastamente estudado, ou seja, um tipo de pesquisa mista (axiomática e empírica), conforme mencionam Morabito e Pureza (2010).

Bertrand e Fransoo (2002) também classificam estes dois tipos de modelagem em normativa ou descritiva. No primeiro caso, trata-se de modelos reais ou idealizados que definem políticas, estratégias ou ações. Já no caso da pesquisa descritiva, a análise do modelo leva a uma explanação ou entendimento de suas características. Neste trabalho, é utilizada predominantemente a pesquisa normativa, uma vez que a definição das áreas das frentes de colheita trata de uma estratégia da empresa e espera-se que o modelo prescreva decisões ou ações no sistema.

Mitroff *et al.* (1974) sugeriram um modelo de resolução de problemas utilizando a visão sistêmica (Figura 2). Neste modelo estão representados seis processos básicos: conceituação, modelagem, resolução do modelo, implementação, validação e *feedback* entre a solução e o modelo conceitual. Outros modelos similares estão descritos em Arenales *et al.* (2007).

A conceituação consiste na interpretação da realidade ou partes dela em um modelo conceitual. Nesta etapa, são incluídas as variáveis a serem estudadas. A modelagem

consiste na representação do modelo conceitual por um modelo científico. Nesta etapa, são estabelecidas as relações causais entre as variáveis. A resolução do modelo consiste no processo de obtenção de uma solução para o modelo científico. A implementação consiste no processo de aplicação da solução obtida na realidade ou situação problema. A validação objetiva verificar se o modelo científico corresponde à realidade ou ao recorte da realidade considerado. O *feedback* consiste na coerência entre a solução obtida e o modelo conceitual.

Na conceituação deste trabalho são enfatizados os seguintes temas: a produção de cana-de-açúcar (seção 2.2) e a logística de colheita da cana (seções 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6). A seção 2.7 mostra o modelo conceitual deste estudo. Também faz parte da conceituação uma revisão da literatura e das principais práticas do setor relacionadas ao planejamento de colheita. Assim, foram estudados conceitos de planejamento da produção (seção 2.1), o planejamento da produção em usinas de cana-de-açúcar (seção 3.1), bem como revisões do VRP (seção 3.2 e Apêndice A), GLSPPL (seção 3.3) e suas variantes, bem como uma revisão sobre métodos de validação de modelos (seção 3.4).

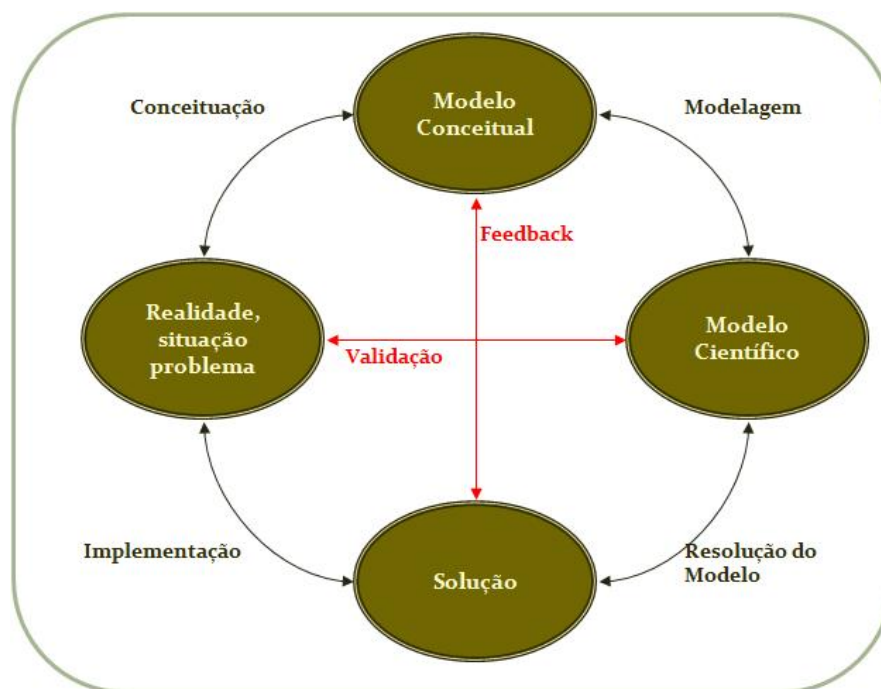


Figura 2: Modelo de resolução de problemas

Fonte: Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

Cabe ressaltar que, embora seja indiscutível a predominância quantitativa do método, o autor analisa o assunto do ponto de vista de observador participante, pois trabalha como consultor em planejamento e logística de colheita de cana-de-açúcar pela Empresa α Consultores Associados há mais de dez anos, atuando direta ou indiretamente em cerca de 50 usinas de diferentes regiões do país. Na conceituação, portanto, são mostrados conceitos

provenientes da observação direta do problema nestas usinas e por meio de discussões com a equipe Empresa α .

Na modelagem são estudados modelos teóricos de pesquisa operacional conhecidos na literatura e, com base no modelo conceitual obtido, foram elaborados modelos matemáticos para o problema em questão (seção 4.1.1). Para testar o modelo proposto, foi elaborada uma instância com dados realistas, todavia com número de variáveis reduzido utilizando uma linguagem de modelagem com *software* de otimização (por exemplo, o pacote computacional GAMS com o solver CPLEX) para verificar a coerência do modelo matemático desenvolvido (seção 4.1.2). O desenvolvimento e a aplicação de uma heurística capaz de resolver os problemas reais de grande porte encontrados na prática são propostos na seção 4.2.

Depois de determinados o modelo matemático e seu método de resolução, essa abordagem de otimização foi aplicada ao caso de usinas típicas do setor: Empresa A (seção 5.1) e Empresa B (seção 5.2), cujos resultados foram comparados e analisados na seção 5.3. A validação do método proposto (vide capítulo 6) foi realizada com base na chamada faceta descritiva do tetraedro da metodologia proposta por Oral e Kettani (1993), de onde foram derivadas as seguintes validações: conceitual (seção 6.1), lógica (seção 6.2), de aptidão (seção 6.3) e de dados (seção 6.4).

1.3 Organização da tese

A tese está dividida basicamente em capítulos subdivididos em seções, sendo que o capítulo 2 aborda a definição do modelo conceitual da tese, bem como o ambiente em que está inserido. Para isso, recorreu-se à vasta literatura sobre o tema, a estudos periódicos de indicadores elaborados por entidades científicas voltados ao mercado e à experiência do autor em consultoria na área. A seção 2.1 inicia este capítulo com alguns conceitos básicos de planejamento da produção relevantes ao entendimento da tese, envolvendo o planejamento hierárquico (seção 2.1.1), o dimensionamento de lotes (seção 2.1.2) e o sequenciamento da produção (seção 2.1.2). A cadeia de suprimentos envolvida é analisada na seção 2.2, os tipos de relacionamentos internos, os diferentes contextos em que ela está inserida, bem como os processos de colheita (seção 2.2.3) e transporte (seção 2.2.4), que são chave para o entendimento da contribuição desta tese. Nas seções 2.3 são abordados fatores importantes para a definição das janelas de tempo das áreas, que constituem restrições fortes dentro do problema estudado. Na seção 2.4 é analisada a setorização das frentes de colheita, processo comumente abordado no setor e na seção 2.5 outros fatores logísticos que influenciam este

tipo de planejamento. Na seção 2.6 é abordado o processo de tomada de decisão na cadeia de produção sucroenergética, outro ponto crucial para o entendimento do horizonte de tempo do modelo proposto. Na seção 2.6 é feita uma síntese do problema estudado, delineando o modelo conceitual do problema.

O capítulo 3 consiste na revisão da literatura propriamente dita. A seção 3.1 explora os modelos relacionados à cadeia de suprimentos em estudo. Especial atenção deve ser dada à seção 3.1.10 que caracteriza a lacuna na literatura preenchida pelo modelo proposto. A seção 3.2 e o Apêndice A fazem uma breve revisão dos modelos VRP, em especial aqueles com janelas de tempo e entrega fracionada. Também são abordados alguns métodos de solução para este tipo de problema. Como durante o desenvolvimento da tese a analogia do problema em questão com o VRP foi abandonada, depois de um tempo, a revisão sobre este tipo de problema e seus métodos de solução não foi estendida. A seção 3.3.1 faz uma revisão dos modelos que tratam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de maneira evolutiva (LSSP – *Lot Sizing and Scheduling Problem*). Uma de suas variantes, o GLSPPL, inspirou o modelo proposto nesta tese. Já a seção 3.3.2 revisa os métodos de solução do GLSPPL divididos em duas partes: métodos exatos e métodos heurísticos. A importância em entender os métodos exatos é grande, pois as heurísticas escolhidas para a resolução do modelo são baseadas em programação matemática, como, por exemplo, o *relax-and-fix* e o *fix-and-optimize*.

O Capítulo 4 apresenta o estudo realizado para a determinação das abordagens propostas baseadas na analogia com o GLSPPL, que são apresentadas na seção 4.1. O primeiro modelo (Modelo 1) é o mais restrito (seção 4.1.1.1). Uma variação do Modelo 1 (Modelo 1A) aplica uma variação nas restrições de capacidade de colheita para reduzir a complexidade do Modelo 1 na obtenção de uma solução factível (seção 4.1.1.2). Já outra variação do Modelo 1 (Modelo 1B) considera variáveis de folga que são penalizadas na função objetivo, facilitando, assim, a obtenção de uma solução factível (seção 4.1.1.3). A seção 4.1.2 utiliza uma instância pequena e realista de teste para entender o comportamento das três abordagens propostas. A seção 4.1.3 faz considerações sobre os modelos propostos.

A seção 4.2 apresenta métodos heurísticos propostos para resolver o modelo matemático. Nesta seção também foram abordadas algumas técnicas de agregação dos blocos de colheita com base espacial e temporal, fundamentais para a redução da quantidade de variáveis inteiras e restrições em todos os métodos de solução estudados (seção 4.2.1). Também foram abordadas algumas estratégias heurísticas construtivas utilizando *relax-and-*

fix (seção 4.2.2) e de melhoria utilizando *fix-and-optimize* (seção 4.2.3). A seção 4.2.4 faz considerações sobre os modelos propostos.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos da aplicação dos modelos em casos reais. O primeiro caso é o da Empresa A (seção 5.1), que possui a colheita completamente mecanizada e é composta por propriedades relativamente grandes para o estado de São Paulo. Nesta seção foram abordados os processos de agregação de blocos (seção 5.1.1), de análise dos dados de entrada (seção 5.1.2), de implementação computacional e análise de experimentos (seção 5.1.3) para o Modelo 1 (seção 5.1.3.1), Modelo 1A (seção 5.1.3.2) e Modelo 1B (seção 5.1.3.3), bem como analisada uma das soluções de boa qualidade obtida (seção 5.1.4). Para a Empresa A também foram tratadas variações de cenários (seção 5.1.5), que são: a análise da safra subsequente à planejada (seção 5.1.5.1), a alteração do número de frentes de colheita (seção 5.1.5.2), a desconsideração das janelas de tempo (seção 5.1.5.3) e a comparação com a técnica de setorização (seção 5.1.5.4), tipicamente utilizada na prática do setor. O caso da Empresa B (seção 5.2) mostra uma realidade mais complexa, com uma empresa em que convivem os dois tipos de colheita (manual e mecanizado), bem como é composta por propriedades menores que a primeira.

O Capítulo 6 aborda o processo de validação do método proposto com base na metodologia proposta em Oral e Kettani (1993), baseada particularmente na faceta descritiva que contempla as validações: conceitual (seção 6.1), lógica (seção 6.2), de aptidão (seção 6.3) e de dados (seção 6.4). Por fim, o Capítulo 7 trata das conclusões da tese e pesquisas futuras.

2 Definição do problema e seu ambiente

O *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2010) define logística como o processo de planejar, implementar e controlar, de maneira eficiente e eficaz, o fluxo e a armazenagem de bens, incluindo os serviços e as informações relacionadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o propósito de adequá-los às necessidades dos clientes. A logística essencialmente agrega valor de lugar e tempo ao produto, pois para ter valor ao cliente o produto deve estar no local e momento desejados (BALLOU, 2004; MORABITO; IANNONI, 2007). Ela envolve a integração de produção, informações, transporte, armazenagem, manuseio de materiais, dentre outros (BOWERSOX; CLOSS, 1996).

Neste trabalho o enfoque é dado ao planejamento e controle do suprimento de matéria-prima a usinas de cana-de-açúcar, em que ela deve estar disponível para moagem no lugar (moendas) e momento (teor de sacarose) certos para que não haja descontinuidades no fluxo. A seção 2.1 aborda conceitos gerais de planejamento da produção necessários para a contextualização do problema de pesquisa, bem como dos métodos de modelagem do problema. Já a seção 2.2 mostra o recorte da cadeia que é analisado, detalhando os tipos de relacionamento entre os elos da cadeia, contextualizando diferenças regionais e aprofundando-se nos processos de maior interesse. As seções 2.3, 2.4 e 2.5 enfocam variáveis relevantes ao planejamento e controle do suprimento de matéria-prima. A seção 2.6 analisa a tomada decisão na cadeia de suprimentos abordada e a seção 2.7 consolida o modelo conceitual do problema da pesquisa.

2.1 Conceitos de planejamento da produção

Alguns conceitos gerais de planejamento da produção, como o planejamento hierárquico, seção 2.1.1, são necessários neste ponto do estudo para uma melhor compreensão do tipo de tomada de decisão na cadeia de produção sucroenergética abordado na seção 2.6, bem como dos modelos encontrados na literatura apresentados na seção 3.1. Além disso, os modelos de dimensionamento de lotes, seção 2.1.2, e sequenciamento da produção, seção 2.1.3, são importantes para a compreensão dos modelos encontrados na literatura para o dimensionamento e sequenciamento de lotes, abordados na seção 3.3.2.

2.1.1 Planejamento hierárquico

A literatura classifica a tomada de decisão em sistemas de gerenciamento da produção em três categorias: estratégico, tático e operacional. Tipicamente, o planejamento

estratégico está relacionado com o projeto e configuração das instalações de produção e distribuição, envolvendo um horizonte de tempo mais longo (por exemplo, anos). Com as instalações definidas, o planejamento tático trata da alocação de recursos para atender a demanda e respeitando restrições de disponibilidade de mão-de-obra, matéria-prima, capacidade de máquinas e equipamentos, dentre outros. Neste horizonte de tempo (por exemplo, meses), algumas variáveis produtivas podem ser agrupadas (agregadas) por possuírem características similares, como os produtos, equipamentos e pessoas. Por fim, o controle operacional lida com as decisões operacionais e de programação de ordens e recursos, envolvendo um horizonte de tempo mais curto, por exemplo semanas ou dias (HAX; CANDEA, 1984).

Segundo Hax e Candea (1984) as decisões estratégicas, táticas e operacionais não devem ser desvinculadas, devido à sua forte interação; esta integração evita problemas com subotimização. Para este tipo de abordagem é necessário que haja a decomposição hierárquica do modelo de tal maneira que as decisões de mais alto nível estejam conectadas com as mais operacionais de uma maneira eficaz. Na seção 2.6, os processos de tomada de decisão relativos à cadeia de produção sucroenergética, enfatizando a área agrícola, serão agrupados seguindo a lógica de um planejamento hierárquico para que o objeto de estudo deste trabalho possa ser mais bem compreendido.

Entretanto, a literatura mostra que a desagregação de planos táticos na programação de curto prazo é um ponto crítico especialmente em processos de manufatura que utilizam sistemas controle como MRP (*Materials Requirement Planning*) e JIT (*Just in Time*), amplamente conhecidos nas empresas e meio acadêmico. Para manter a coerência na programação, a desagregação deve ser feita por meio de técnicas específicas como as propostas por Hax e Candea (1984) e Nahmias (1993), por exemplo.

Especialmente para atender necessidades de sistemas MRP, sofisticções mais recentes são observadas na literatura visando integrar em um mesmo modelo os conceitos de dimensionamento e sequenciamento de lotes, bem como incorporar detalhamentos da visão de curto prazo em horizontes de decisão de médio prazo, como podem ser observados no Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP – *General Lotsizing and Scheduling Problem*) (FLEISCHMANN; MEYR, 1997; DREXL; KIMMS, 1997; MEYR, 2000; HAASE; KIMMS, 2000; JANS; DEGRAEVE, 2008; ALLAHVERDI *et al.*, 2008), abordado com maior detalhe na seção 3.3. As seções seguintes mostram os conceitos envolvidos em cada um dos modelos que compõe o GLSP: dimensionamento de lotes, seção 2.1.2, e sequenciamento da produção, seção 2.1.3.

2.1.2 Dimensionamento de lotes

De acordo com Kuik *et al.* (1994), o dimensionamento de lotes trata do agrupamento de itens para que possam ser produzidos e transportados em um mesmo momento. Se, de um lado, esta técnica pode gerar alguma falta de sincronismo, com a taxa de demanda gerando estoques ou pedidos não atendidos, de outro, gera economia por meio da redução dos tempos de preparação, de ganhos de escala e poder de barganha na aquisição de recursos. Hax e Candea (1984) destacam que, neste tipo de planejamento agregado da produção, devem ser considerados os custos de preparação, introduzindo variáveis inteiras aos modelos de programação matemática, aumentando a complexidade da solução de problemas de grande porte.

Kuik *et al.* (1994) classificam os modelos de dimensionamento de lotes em dois eixos: se possuem restrição de capacidade e se a demanda é estacionária ou dinâmica. Hax e Candea (1984) também tratam o nível de trabalho que pode ser fixo ou variável. Nahmias (1993) destaca o dimensionamento de lotes no controle de nível de estoques. Por fim, Karimi *et al.* (2003) destacam as seguintes características para este tipo de problema:

- ✓ Horizonte de planejamento: pode ser finito com demanda dinâmica ou infinito com demanda estacionária. Pode ser do tipo *big bucket* produzindo múltiplos produtos, ou *small bucket* produzindo apenas um produto por período. O horizonte pode ser rolante (ou móvel, como preferem alguns autores) para o caso de muita incerteza nos dados.
- ✓ Número de estágios: pode ser único ou múltiplos.
- ✓ Número de produtos: também pode ser único ou múltiplos.
- ✓ Restrições de capacidade ou recursos: pode ser capacitado ou não capacitado, relacionando à força de trabalho, equipamentos, orçamento, dentre outros.
- ✓ Deterioração dos produtos: pode ser significativo ou não.
- ✓ Demanda: pode ser dinâmica ou estática, determinística ou probabilística, independente ou dependente (quando a produção do item depende de outro em um estágio distinto).
- ✓ Tempos ou custos de preparação (*setups*): podem ser simples ou complexos. Os complexos podem ser divididos em *carry-over*, quando a preparação pode ser transportada para o período seguinte; agrupamento por família de produtos, pois itens diferentes da mesma família podem ter impactos reduzidos ou insignificantes; e dependentes da sequência.
- ✓ Falta de estoque: se a demanda pode ser atendida em um momento futuro ou se a falta do produto implica em venda perdida.

2.1.3 Sequenciamento da produção

O sequenciamento da produção propriamente dito está associado na literatura de *scheduling* (programação) com decisões de curto prazo. Decisões típicas neste nível são: a atribuição de um pedido a determinada máquina; o sequenciamento destas ordens no chão de fábrica; a contabilidade e controle de estoques; a emissão, expedição e processamento de pedidos; bem como a programação de veículos (HAX; CANDEA, 1984). Nahmias (1993) destaca os seguintes fatores que interferem no sequenciamento da produção: o padrão de chegada dos pedidos, que pode ser estático ou dinâmico; o número e variedade de máquinas disponíveis no chão de fábrica; o número de operários; o padrão de fluxo de cada produto; bem como as regras de avaliação de desempenho.

O padrão de fluxo dos produtos de um sistema de manufatura pode ser basicamente de dois tipos: *flow shop* ou *job shop*. O primeiro tipo é quando os n processos são aplicados pelas m máquinas na mesma ordem para todo produto. Para o segundo tipo, esta ordem pode mudar. Além disso, quando há máquinas idênticas, um mesmo processo pode ser feito simultaneamente em mais de um item. Cabe ressaltar que as máquinas podem ter funções idênticas, mas capacidades distintas e, mesmo assim, processar mais de um produto simultaneamente.

Para a determinação destas regras, vários objetivos podem ser abordados como: o atendimento de datas de entrega, a minimização do material em processo, a minimização do tempo médio do produto no sistema, a minimização de tempos ociosos para máquinas/trabalhadores, a redução de tempos de preparação (*setup*), a minimização de custos de produção e mão-de-obra, bem como fornecer informações precisas para o estado do trabalho. Comumente mais de um objetivo pode ser adotado por um processo de manufatura.

Com relação ao título da tese, ao invés do termo “PROGRAMAÇÃO DE FRENTES DE COLHEITA” poderia ser usado “PLANEJAMENTO DE FRENTES DE COLHEITA” devido ao horizonte de tempo ser de uma a uma safra e meia. Entretanto, optou-se pelo primeiro termo devido à modelagem estudada nesta tese partir de problemas de *lot-sizing and scheduling* e o termo programação ser mais próximo deste conceito.

2.2 Cadeia de suprimentos

A cadeia de suprimentos envolvida no fornecimento de cana-de-açúcar à unidade fabril está resumidamente representada na Figura 3, enfocando a etapa agrícola e a industrial, como também detalhando as atividades de apoio da etapa agrícola. Analisando-se este sistema, percebe-se que as atividades de colheita, transporte, recepção e extração

compõem a principal ligação entre as etapas agrícola e industrial. Elas possuem um grande dinamismo devido à perecibilidade do material em processo nesse momento, à variabilidade dos fatores envolvidos, um custo representativo em relação ao total de produção, e podem comprometer a quantidade e a qualidade do produto final.

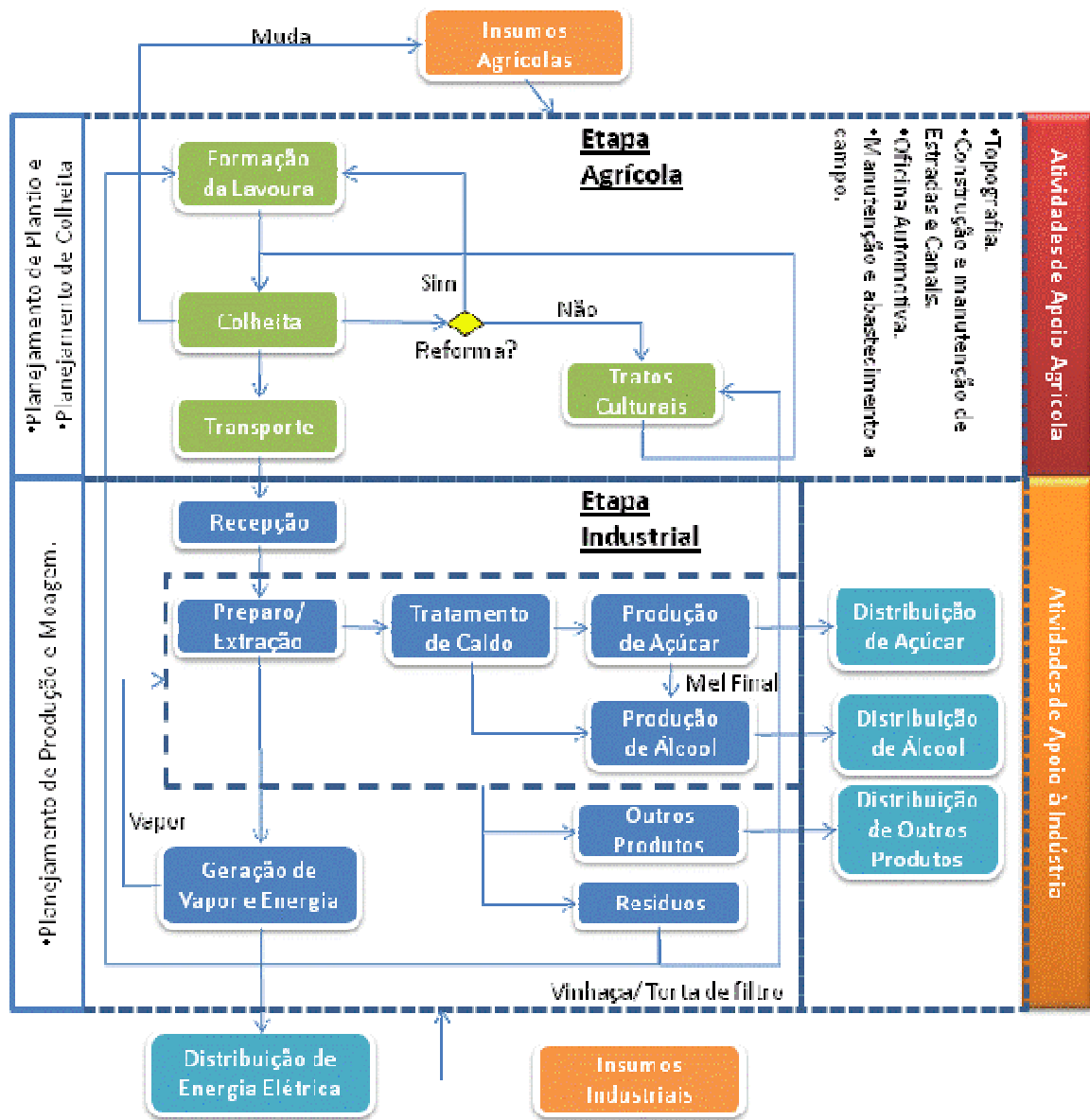


Figura 3: Recorte da cadeia de suprimentos

Fonte: Yamada *et al.* (2002) adaptado.

Para o entendimento da dinâmica da etapa agrícola nesta cadeia, deve-se atentar para duas unidades de medida: de área, tipicamente hectares (ha), relacionada às atividades de formação da lavoura e colheita; e de peso, toneladas (t), relacionada às atividades de colheita, transporte e recepção na indústria. A unidade de área mínima tratada

nas usinas é o talhão (ou lote), que pode ser agrupado em blocos (ou glebas) de acordo com critérios que serão discutidos posteriormente nesta tese.

As próximas seções analisam de maneira mais detalhadas vários aspectos relacionados à Figura 3. Em particular, na seção 2.6 o conhecimento da cadeia de suprimentos é importante para entender os vários tipos de tomada de decisão envolvidos nesse estudo, que foram parte da base da elaboração da seção 3.1 que envolve a revisão da literatura de modelos de planejamento e controle em usinas de cana-de-açúcar.

2.2.1 Tipos de relacionamentos no sistema agroindustrial

O grau de integração entre os elos de formação da lavoura, colheita, transporte e todo o processamento industrial é bastante variável de acordo com o contexto regional de cada usina. Dependendo desta integração, diferentes mecanismos de planejamento e controle da produção se adequam à coordenação deste sistema agroindustrial.

Em países como Austrália (HIGGINS *et al.*, 2007), África do Sul (LEJARS *et al.*, 2010) e Tailândia (PIEWTHONGNGAM *et al.*, 2009), existe uma tendência dos quatro elos serem independentes, uma vez que nestes locais os proprietários das áreas são pequenos e médios, possuindo uma visão acentuada de produção empurrada. Neste caso, o papel da usina é de coordenadora da cadeia, embora esteja sujeita a atitudes oportunistas destes agentes.

No caso de países como Brasil (JENA; POGGI, 2013) e Venezuela (GRUNOW *et al.*, 2007), embora haja situações semelhantes ao caso citado anteriormente, chamados no jargão do setor de fornecedores, predomina uma ação mais direta da usina na operação. No Brasil, é comum encontrar áreas de cana-de-açúcar da própria usina, arrendada por ela e de parceria. Nesta última, a empresa agrícola seria um prestador de serviço para o produtor rural, que recebe o preço integral da matéria-prima. Em todas estas situações, a empresa agrícola detém o controle das operações de formação da lavoura, colheita e transporte, sendo que no caso de parceria, o proprietário da terra pode optar por realizar integralmente a formação da lavoura e tratos culturais, bem como selecionar as operações agrícolas que lhe parecem mais convenientes. Recentemente, no Brasil, vem se destacando a presença de operadores logísticos, ora controlando operações como o plantio, a colheita e o transporte, ora arrendando equipamentos para a empresa agrícola.

Neste trabalho, a programação das frentes de colheita se aplica à parte da operação em que a usina detém o controle da colheita e transporte. As áreas de fornecedores são tratadas como uma condição de contorno.

2.2.2 Contexto operacional das usinas

No Brasil, a produção de cana-de-açúcar se estende por vários estados, gerando consideráveis diferenças regionais. Assim, a dinâmica do setor nas diferentes regiões produtoras impacta no comportamento do sistema agroindustrial e, conseqüentemente, na escolha dos métodos de planejamento e controle. Estas regiões podem ser divididas em Centro-Sul tradicional, Centro-Sul expansão e Nordeste (PECEGE, 2009).

De acordo com PECEGE (2009), a região Centro-Sul tradicional compreende os estados do Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo, com exceção do oeste paulista. Nestas regiões a cultura canavieira já se encontra consolidada nos últimos 20 anos, em decorrência do Proálcool. Sendo assim, há maior disponibilidade de mão-de-obra qualificada, rede de concessionárias de equipamentos agrícolas estruturada, bem como áreas de cana consolidadas. Entretanto, é caracterizada também por áreas mais caras e fragmentadas, com maior pressão imobiliária, concorrência entre usinas e com maior dificuldade de mecanização que as áreas de expansão. Neste contexto de redução e encarecimento de áreas para as usinas, acaba existindo uma seleção natural em que algumas unidades desaparecem e suas áreas são incorporadas pelas remanescentes. Também são comuns os contratos de parceria e a presença de pequenos fornecedores. Dessa forma, o planejamento estratégico deve atentar-se para a adequação da logística à subtração de áreas ou à fusão com outras existentes de outras usinas.

Já nas regiões de expansão, que compreendem os estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e oeste de São Paulo, predominam áreas grandes, mecanizáveis e com valor da terra menor (PECEGE, 2009). No entanto, há maior dificuldade para encontrar mão-de-obra, assistência técnica dos equipamentos e também consolidar as áreas de colheita. Neste outro contexto, o planejamento estratégico deve atentar-se ao ajuste da logística à incorporação de novas áreas, bem como à formação de grandes polos de usinas.

Na terceira região, que abrange os estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba, embora tenham tradição quadricentenária na cultura, existe também o plantio em áreas íngremes, dificultando sobremaneira a mecanização da colheita. Dessa forma, o foco deste estudo será nas duas primeiras regiões brasileiras.

2.2.3 Processo de colheita

Conforme pode ser observado na Figura 3, a atividade de colheita depende do trabalho desenvolvido nas etapas de formação da lavoura e tratos culturais. Esse trabalho envolve desde a seleção varietal em função das condições edafo-climáticas locais, ou seja, solo e clima, passando pelas técnicas de preparo de solo, plantio, adubação, a adequação ao

sistema de colheita adotado, as condições da malha viária até a recepção na unidade fabril (RIPOLI; PARANHOS, 1987).

O corte pode ser realizado de duas maneiras: o corte manual e o mecanizado. Antes do corte manual, geralmente é realizada a queima da cana para eliminar a palha, o que aumenta consideravelmente o rendimento de corte, conforme mencionam Yamada *et al.* (2002). Depois de cortada, a cana é organizada em esteiras ou montes, seguindo os sulcos da cana e colocada em feixes nas carretas canavieiras por meio das carregadoras Figura 4 (a). O corte mecanizado é realizado simultaneamente ao carregamento da unidade de carga pela colhedora, que separa as palhas, corta as pontas, corta e pica a cana Figura 4 (b).



Figura 4: (a) Carregamento com corte manual. (b) Carregamento com corte mecanizado

Fonte: LogTrac (2009) e UNICA (2013)

2.2.3.1 Potencial de colheita

O cálculo de potencial de colheita adotado neste estudo é o mesmo utilizado pela Empresa α , que é adaptado de Fernandes (2003). Ele leva em conta a produtividade do canavial, as características de projeto do talhão, bem como variáveis operacionais, e pode ser definido em função dos seguintes parâmetros:

- ✓ Produtividade da cana, ou seja, toneladas de cana por hectare (*tch*): representa a quantidade estimada de cana por unidade de área. Ela varia em função de diversos fatores, como ambiente de produção, variedade e estágio de corte, e é estimada a partir de levantamentos feitos a campo pela equipe técnica da usina ou de dados históricos.
- ✓ Espaçamento (*e*), em metros: representa a distância entre as linhas de cana. O espaçamento é uma característica do desenho do talhão e pode variar em função do tipo de solo, relevo, de condições de irrigação e de questões culturais.

- ✓ Tamanho do tiro de colheita (tr), em metros: representa a distância que a colhedora opera na linha de cana sem manobrar, conforme Figura 5. O tamanho do tiro também é uma característica do projeto do talhão e varia em função do relevo, bem como da definição de carregadores (estradas secundárias para o deslocamento de máquinas agrícolas), curvas de nível e outras movimentações de terra realizadas na formação da lavoura.
- ✓ Velocidade de operação (v): em quilômetros por hora: representa a velocidade de colheita da máquina em operação. Trata-se de uma variável operacional dependente da destreza do operador, mas também varia em função da produtividade da área e do projeto do talhão.
- ✓ Tempo de manobra (tm), em minutos: representa o tempo em que a colhedora leva para sair de uma linha de cana, virar, alinhar à linha subsequente e aguardar o veículo de transbordo manobrar, para prosseguir o processo de colheita. Trata-se também de uma variável operacional, mas que sofre influência de características do projeto do talhão como o dimensionamento de carregadores.

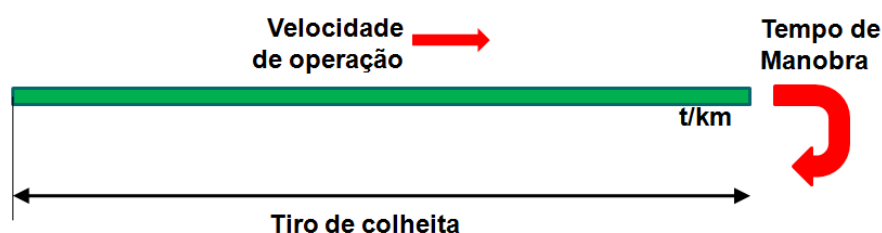


Figura 5: Operação da colhedora

Fonte: LogTrac (2010a)

Assim, o potencial de colheita (pcl) em toneladas por hora por colhedoras pode ser calculado da seguinte maneira:

$$pcl = \frac{t}{km} * vm \quad (1)$$

onde

$$\frac{t}{km} = \frac{tch * e * 1000}{10000} \quad (2)$$

$$vm = \frac{tr}{\left(\frac{tr}{v * 1000} + \frac{tm}{60}\right) * 1000} \quad (3)$$

Dessa forma, o potencial de colheita na equação (1), pcl , é diretamente proporcional à quantidade de cana por metro linear, t/km , existente na área da equação (2) e da velocidade média, vm , de colheita na equação (3). A primeira variável depende diretamente da produtividade da área e do espaçamento entre as linhas. Já a segunda leva em conta o tamanho do tiro de colheita, a velocidade de operação e o tempo de manobra. Quanto maior o

tiro de colheita e a velocidade de operação, maior a velocidade média, da mesma forma que, quanto maior o tempo gasto na manobra, menor a velocidade média.

2.2.4 Processo de transporte

O sistema de transporte de cana-de-açúcar agrega valor de espaço e tempo, deslocando o produto do campo para a usina nos momentos em que ela é necessária para a moagem. No Brasil, embora haja casos de outros modos de transporte como o hidroviário, predomina o transporte rodoviário, diferente de outros países produtores de cana como a Austrália, onde predomina o ferroviário. O ciclo dos caminhões compreende as etapas mostradas na Figura 6.

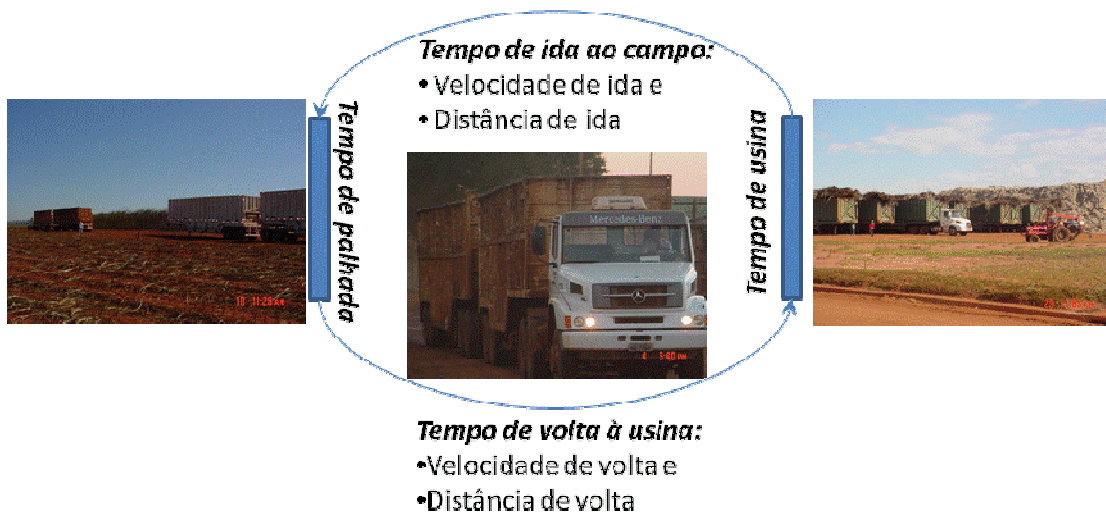


Figura 6: Etapas do ciclo do caminhão canavieiro

Fonte: LogTrac (2010c)

O desempenho dos veículos nos percursos de ida e volta depende, principalmente, dos seguintes fatores:

- ✓ Condições do sistema viário, em termos de condição de conservação das estradas e do relevo que impactam na velocidade dos veículos e conservação da frota, bem como de fluxo de tráfego e de trevos de acesso às fazendas, que podem causar tempos de espera para a passagem dos veículos.
- ✓ Organização dos percursos vazios e carregados pelos gestores da usina, para evitar cruzamento de veículos em pistas estreitas e sinalizando para que o motorista não se perca no caminho.
- ✓ Nível de destreza e comprometimento do motorista.

Já o desempenho dos veículos com relação ao tempo no campo, ou tempo de palhada como é conhecido no setor, depende da capacidade de produção das frentes de colheita. Se forem enviados caminhões com capacidade de transporte maior que a capacidade de colheita da frente, é esperado o surgimento de filas de espera, aumentando o tempo de palhada. Quanto ao tempo de usina, ele está diretamente relacionado com a taxa de moagem, bem como com o dimensionamento dos estoques reguladores na usina, como estoques sobre rodas, os pátios e os barracões de cana, os dois últimos condenados pelo comprometimento da qualidade da matéria-prima, que não acontece no primeiro tipo de estoque, caso o tempo de armazenagem seja curto (STUPIELLO, 1987).

2.2.4.1 Tecnologia de transporte

A tecnologia adotada no transporte de cana vem se modificando consideravelmente nos últimos 20 anos, obedecendo à legislação de trânsito. Para a maximização da capacidade de carga dos veículos, há a necessidade de optar por veículos mais potentes com maior custo de aquisição. Sendo assim, torna-se relevante o aumento da utilização destes equipamentos para uma maior diluição de seus custos fixos.

As configurações de caminhões mais utilizadas em usinas de cana-de-açúcar são separadas por dois tipos de caminhões plataforma e cavalo mecânico, bem como pelo número de cargas rebocadas (HAHN; RIBEIRO, 1999). Estas configurações podem ser visualizadas esquematicamente na Figura 7. No caso do cavalo mecânico, quando é composto por dois semi-reboques, o dole é o equipamento que possui dois eixos e suporta a segunda unidade de carga.

As resoluções 210 e 211 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), de 13 de novembro de 2006, regulamentam o comprimento máximo do veículo (30 m), bem como seu peso bruto total combinado, que é função da sua quantidade de eixos. Neste sentido, o rodotrem possui grandes vantagens, já que tem nove eixos frente aos sete eixos do treminhão, além da maior eficiência no sistema de troca de unidades rebocadas, denominado bate-e-volta no setor. Uma alternativa ao dole é a utilização do reboque com rala fixa, ao invés de dole mais semi-reboque, todavia, nessa configuração, a segunda unidade de carga perde a intercambiabilidade com o semi-reboque.





Caminhão plataforma solteiro.	
Caminhão plataforma com uma carga rebocada (romeu-e-julieta).	
Caminhão plataforma com duas cargas rebocadas (treminhão).	
Cavalo mecânico com duas cargas rebocadas (rodotrem).	

Figura 7: Tecnologias de transporte utilizadas no transporte de cana-de-açúcar

Fonte: LogTrac (2010a)

O rodotrem também possui desvantagens em relação ao treminhão, pois necessita de maiores raios de manobra devido ao arraste da última carreta, devendo isto ser previsto na definição da circulação no parque industrial, bem como nas estradas internas da usina.

2.2.4.2 Sistema de intercâmbio de carretas, “bate-e-volta”

O sistema “bate-e-volta” é um jargão do setor que se refere ao intercâmbio de unidades de carga (carretas), visando aumentar a utilização da unidade tratora por meio de estoques pulmões sobre rodas com as cargas rebocadas. Desta forma, na palhada e na indústria é possível executar o carregamento e o descarregamento das unidades rebocadas sem vincular com o processo das unidades tratoras.

O rodotrem é a tecnologia de transporte mais beneficiada com este tipo de operação, já que a unidade tratora não é nem carregada nem descarregada. No caso da tecnologia do caminhão plataforma, também é possível realizar o “bate-e-volta”, todavia, pelo fato de a unidade tratora também ser uma unidade de carga, é necessário que ele entre na palhada para o carregamento para o caso da colheita com corte manual, ou espere o transbordo no caso do corte mecânico e também descarregue na usina. Entretanto, sistemas que priorizam o processamento do caminhão podem reduzir os tempos de palhada e descarregamento.

O benefício deste sistema está em aumentar a utilização do caminhão, que é o recurso mais caro, além de reduzir a complexidade no gerenciamento dos motoristas. Em

contrapartida, é necessário o investimento em unidades rebocadas e em doles necessários para transportar as unidades de carga por tratores.

O estoque sobre rodas também possui importante função no sistema logístico, regulando eventuais discontinuidades passageiras do fluxo de entrega de cana. Anteriormente, eram utilizados barracões e pátios de cana para esta mesma função, no entanto, eles vêm sendo gradualmente substituídos devido às perdas de qualidade da matéria-prima neste tipo de armazenagem. Outro mecanismo de regulação de estoque é feito por meio dos próprios caminhões, porém, incorre em custos mais elevados por aumentar seu tempo de ciclo e, conseqüentemente, reduzir seu rendimento.

2.2.4.3 Potencial de transporte

O cálculo de potencial de transporte adotado neste estudo é o mesmo utilizado pela Empresa α e proposto por Milan *et al.* (2006). Este potencial associado às áreas de colheita é função das seguintes variáveis:

- ✓ Tempo de ciclo (tc): corresponde ao tempo de ciclo (em horas) dos caminhões, e é composto pelas variáveis mencionadas anteriormente na Figura 6 tempo de ida, composto pela velocidade de ida (v_i) e distância de ida (d_i), tempo de palhada (tp); tempo de volta, composto pela velocidade de volta (v_v) e distância de volta (d_v); e tempo de usina (tu):

$$tc = \frac{d_i}{v_i} + tp + \frac{d_v}{v_v} + tu \quad (4)$$
- ✓ Densidade de carga (dc): corresponde à quantidade líquida de cana trazida por uma unidade de carga, em toneladas, para a usina. Cabe ressaltar que este parâmetro pode variar conforme a época do ano, se a cana-de-açúcar secar muito durante o período de seca.
- ✓ Número de cargas (nc): corresponde ao número de cargas trazido pelos veículos canavieiros.

Assim, o potencial de transporte (pt), em toneladas por hora por caminhão, é calculado da seguinte maneira:

$$pt = \frac{dc * nc}{tc} \quad (5)$$

2.3 Período de utilização industrial

Caracterizada como uma cultura semiperene, a cana-de-açúcar, *saccharum officinarum*, é uma planta da família *Gramineae* do gênero *Sacharum* e possui alta eficiência na conversão de energia solar em sacarose (ARANHA; YAHN, 1987). Após o seu corte, a

planta rebrota, embora possa perder produtividade a cada corte. O ciclo utilizado comercialmente é de cinco cortes, embora esta análise envolva uma avaliação econômico-financeira. Exceto no caso da cana de primeiro corte, que pode ficar na terra por até dezoito meses, é praticado o corte da planta com doze meses (FERNANDES, 2003). Caso a planta seja cortada com uma idade inferior a esta, pode ocorrer perda de produtividade e açúcares. A aplicação de maturadores pode reduzir a perda de açúcares. Neste caso, Nunes Jr (1987) explana sobre a atuação de maturadores.

A irrigação e/ou fertirrigação com vinhaça, especialmente quando a área é muito seca, podem atuar favoravelmente no desenvolvimento da planta, tanto no aumento da produtividade, quanto da longevidade de canavial, ou seja, aumentar o número de cortes viáveis economicamente. A composição da cana-de-açúcar é muito variável em função das condições do ambiente de produção, estágio de corte, época de corte e variedade. Fernandes (2003) mostra a seguinte composição média dos dois primeiros cortes da variedade RB72454 coletada pelo Centro de Tecnologia Copersucar: 10,9% de fibra (sólidos não solúveis), 71,1% de água e 18% de brix (sólidos solúveis). O brix, por sua vez, é formado por 15,5% de sacarose (pol), 0,5% de glicose e frutose e 2% de não açúcares.

O ambiente de produção da cana-de-açúcar é definido em função de aspectos físico-hídricos, químicos e morfológicos dos solos. A água constitui um dos fatores principais do ambiente, pois por mais que o solo tenha características favoráveis, se a disponibilidade de água for limitante, o desempenho da planta é comprometido (PRADO, 2005). A cana-de-açúcar passa por dois períodos característicos: um com crescimento vegetativo com pequeno acúmulo de sacarose e outro de acúmulo intensivo de sacarose motivado pela escassez de recursos necessários ao seu crescimento. É comum a segunda etapa ocorrer em períodos mais secos e a primeira, nos mais chuvosos. Dessa forma, são formadas as curvas de maturação características de cada variedade com um pico de sacarose no meio da safra, vide Figura 8 (STUPIELLO, 1987).

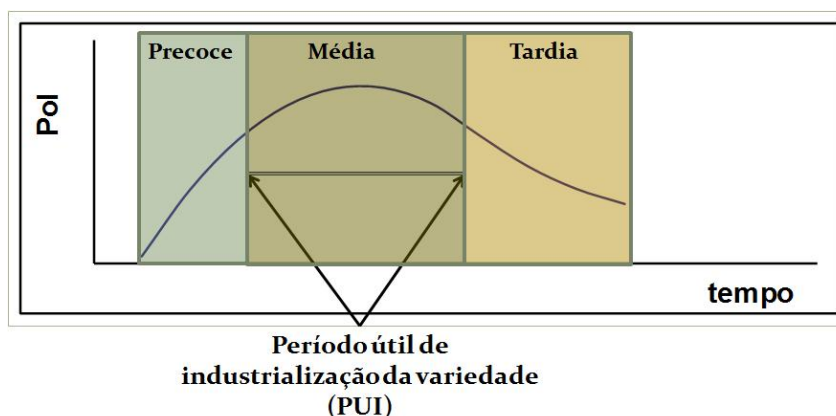


Figura 8: Curva de maturação da cana-de-açúcar

Fonte: LogTrac (2010c)

Para obter o aproveitamento máximo de açúcares, seria interessante colher toda a matéria-prima no pico de concentração de sacarose, todavia seria necessária uma superestrutura de colheita, transporte e processamento industrial, uma vez que o produto é perecível (JIAO *et al.*, 2005). Sendo assim, para a região Centro-Sul brasileira, a safra se estende, em geral, de abril a novembro, aproximadamente oito meses de safra. Para a colheita neste período foram sendo desenvolvidas variedades que possuem maior aptidão para o início (precoce), meio (média) e final de safra (tardia). Sendo assim, variedades mais ricas são interessantes de serem colhidas no meio de safra, já as que apresentam uma menor diferença entre o teor de açúcares no início e meio de safra são mais interessantes de serem precoces (GILBERT *et al.*, 2012).

Assim, na determinação do PUI (período útil de industrialização) são considerados o comportamento da curva de maturação e das características agrônômicas da variedade. Exemplos destas características são: o potencial de florescimento e de isoporização, qualidades indesejáveis à planta comercial, pois consome açúcares e compromete a extração do existente; a qualidade da brotação após o corte, que determina o rendimento da planta nos cortes seguintes; a resposta a maturadores, que induzem o acúmulo de açúcares fora do período de pico, dentre outros fatores (NUNES JR, 1987).

Os principais centros desenvolvedores de cana-de-açúcar no Brasil transmitem às usinas as características das variedades para que sua equipe agrícola determine o PUI com base nos ambientes de produção disponíveis. Com as áreas das frentes de colheita previamente definidas, como é proposto neste trabalho, é possível também a escolha da variedade adequada à logística de colheita.

2.4 Setorização das frentes de colheita

A atribuição de áreas geográficas contínuas para a atuação das frentes é uma prática bastante observada nas usinas estudadas. Esta divisão tem vários propósitos do ponto de vista logístico. Um destes propósitos é a contratação de pessoal residente próximo a estas regiões. Com isso pode-se direcionar o ônibus diretamente para a frente de colheita, minimizando sua distância de percurso e o tempo de deslocamento das pessoas ao local de trabalho. Outra finalidade seria a de posicionar a estrutura de abastecimento e manutenção próxima desta região, usual no caso de regiões muito distantes da usina. Por fim, como mencionado anteriormente, esta prática possibilita também reduzir o impacto da perda de capacidade ocasionada pelo deslocamento da frente causado pela mudança de área. Apesar desta setorização poder ser feita por meio de áreas contínuas equidistantes da usina e, assim, balanceando a capacidade de transporte, é mais complexo equilibrar simultaneamente a capacidade de colheita e as janelas de tempo, definidas, por exemplo, pelo PUI e a idade.

Tipicamente, as usinas estudadas utilizam a setorização como dado de entrada dos modelos de planejamento de colheita e plantio. Em geral fixam uma área à frente de colheita com base em mapas cartográficos. O modelo proposto neste trabalho define a frente de colheita do bloco com base no equilíbrio das janelas de tempo, das capacidades de colheita e transporte. Assim, além dos atributos geográficos, a formação de setores das frentes leva em conta fatores operacionais, reduzindo a possibilidade de desvio do plano de colheita.

2.5 Outros fatores logísticos

Além das capacidades de colheita e transporte, bem como o PUI, outros fatores interferem no sequenciamento das frentes de colheita. Dentre estes fatores pode-se citar:

- ✓ Flutuações na capacidade de processamento da indústria.
- ✓ Comportamento da entrega de fornecedores.
- ✓ Liberação de áreas de vinhaça.
- ✓ Áreas com risco de incêndio.
- ✓ Áreas com risco de inundação.
- ✓ Áreas com solos com baixa retenção de água.
- ✓ Trafegabilidade das estradas.

2.5.1 Flutuações na capacidade de processamento da indústria

Paiva e Morabito (2009, 2011 e 2013) modelaram o planejamento da produção industrial de açúcar, álcool e energia elétrica como um problema de seleção de processos. De

acordo com os autores, cada um dos possíveis processos produz um *mix* de produtos finais de acordo com a qualidade da matéria-prima e gargalos de processo, já que é um processo divergente, ou seja, são obtidos vários produtos simultaneamente a partir de uma única matéria-prima. O modelo apresentado maximiza a margem de contribuição ao lucro, determinando a quantidade de matéria-prima processada e os processos selecionados no período, com base na previsão de qualidade da matéria-prima, condições de comercialização no período, dentre outros.

Sendo assim, dependendo do plano industrial, pode haver épocas do ano em que, dado um nível de qualidade, sejam desejadas quantidades diferentes de matéria-prima para obtenção de maior lucratividade. Então, as áreas com menor potencial de colheita e transporte podem ser colhidas nas épocas de menor demanda por quantidade de cana e as de maior potencial, nas épocas de pico de processamento industrial.

2.5.2 Comportamento da entrega de fornecedores

O comportamento de fornecedores que entregam cana na esteira da usina é bastante oportunista. Se não são regrados, concentram seu esforço de colheita na época de pico de açúcares, uma vez que a matéria-prima é remunerada de acordo com sua qualidade, conforme Piewthongngam *et al.* (2009). Estes autores propuseram uma abordagem que interfere no plano de cultivo dos produtores na Tailândia. O ganho potencial estimado pelos autores seria de 23% da produção.

No Brasil, as usinas buscam colocar cotas mensais, semanais e diárias baseadas no total de cana do fornecedor. Estas cotas dosariam a entrega do fornecedor uniformemente durante o ano. Entretanto, esta estratégia é mais difícil de ser implementada em regiões em que há uma concorrência mais acirrada entre as usinas. Nos últimos anos a Conselho de Produtores de cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo (CONSECANA), órgão que regulamenta a forma de pagamento da matéria-prima em vários estados do Brasil, propõe um pagamento por teor de açúcares relativo ao período. Outros métodos de pagamento de matéria-prima baseados em sua qualidade também têm sido propostos na literatura (LEJARS *et al.*, 2010).

Por mais que se pense em mecanismos para inibir este comportamento oportunista, esta é uma questão bastante conflituosa. Sendo assim, a definição das frentes de colheita em estudo deve levar em conta que a entrega de fornecedores é variável durante o ano. Dessa forma, quando ela é alta, a entrega realizada pela operação da usina deve ser menor e vice-versa. Assim, como no caso da demanda industrial, em época de maior entrega

de fornecedores, a operação da usina deve buscar a colheita de áreas com menores potenciais de produção de colheita e transporte.

2.5.3 Liberação de área de vinhaça

A vinhaça é um subproduto direto da produção de álcool em usinas de cana-de-açúcar. Para cada litro de álcool são produzidos aproximadamente 13 litros de vinhaça, para níveis de diluição e qualidade da matéria-prima padrão. Devido ao seu potencial hídrico, bem como à sua riqueza em nutrientes como carbono orgânico e potássio, a utilização deste subproduto por meio de fertirrigação dos canaviais vem sendo largamente empregada para a obtenção de ganhos de produtividade agrícola (DE VASCONCELOS *et al.*, 2010; SINGH *et al.*, 2007).

A aplicação da vinhaça na lavoura é realizada nos períodos pré-emergente e emergente por meio de aspersores, gotejadores e pivôs centrais. Os benefícios de sua aplicação estão limitados a níveis máximos de concentração de nutrientes, determinado pelos órgãos reguladores de acordo com o estado de saturação do solo. Uma vez que estes limites forem extrapolados, a vinhaça se transforma em contaminante do solo penalizando o ambiente e onerando a cadeia produtiva.

Dessa forma, a aplicação eficiente da vinhaça deve considerar o sincronismo entre o ritmo de produção de vinhaça pela usina e o ritmo de aplicação na lavoura. Cabe ressaltar que a composição da vinhaça é dependente do processo industrial, bem como das características da matéria-prima. Se o mix de produção possui uma proporção maior de açúcar, a vinhaça tende a ser mais concentrada, devido à produção de álcool a partir do mel final, subproduto do processo de açúcar. Um processo adicional de concentração de vinhaça vem sendo aplicado para baratear o transporte ao campo (PARNAUDEAU, *et al.*, 2008). Sendo assim, este sincronismo também depende da composição da vinhaça produzida. No planejamento de colheita, deve ser prevista a colheita gradual de áreas onde a vinhaça possa ser aplicada (JENA; POGGI, 2013). Da mesma forma, a definição das áreas de colheita deve levar em conta esta condição.

2.5.4 Áreas de risco de incêndio

Incêndios acidentais são eventos bastante temidos pela equipe agrícola de usinas por vários fatores, como: o dano ambiental, a antecipação da colheita de áreas com canavial novo ou com tipo de variedade inadequado, a perda de qualidade devido ao elevado tempo entre queima e colheita, a perda do canavial naquela safra propriamente dita e,

finalmente, a ruptura da logística de colheita, devido a desvios da frente para processar a cana queimada. Sendo assim, especialmente em regiões mais secas, são adotadas estratégias para acelerar a colheita de áreas de risco de incêndio no período chuvoso, para que o combustível do fogo (*i.e.*, a cana) no período seco seja reduzido.

Estas áreas de risco são regiões próximas a estradas de grande movimentação, de cidades, dentre outras. Além disso, em locais com grandes concentrações de cana, são feitas barreiras contra o fogo, colhendo-se faixas de cana, formando corredores de isolamento com menor quantidade de matéria seca. Com isso, busca-se reduzir a área afetada por incêndio acidental. Em áreas com risco de incêndio a colheita deve ser forçada em janelas de tempo antes do acúmulo de matéria seca.

2.5.5 Áreas de risco de inundação

Este é o caso contrário das áreas relatadas no item anterior. Em locais onde há tendência da umidade mudar substancialmente a plasticidade do solo, deve-se evitar a colheita no período mais chuvoso, para evitar danificar o canavial, os equipamentos de colheita, compactar o solo e reduzir o rendimento de colheita. Nestas áreas deve-se forçar a colheita em janelas de tempo no período mais seco.

2.5.6 Áreas de solo com baixa capacidade de retenção de água

Nas áreas com baixa capacidade de retenção de água e solos com composição mais arenosa, é desejável que a cana seja colhida no período mais chuvoso, em que a umidade residual do solo seja suficiente para suprir as necessidades fisiológicas da planta até a sua emergência, período mais crítico ao seu desenvolvimento. Novamente, nestas áreas deve-se forçar a colheita em janelas de tempo fixadas no período mais úmido.

2.5.7 Trafegabilidade das estradas

Nas épocas mais chuvosas, a manutenção das estradas não pavimentadas é mais complexa pelo fato de a enxurrada levar os agregados do solo e formar valetas, dentre outros fatores. Sendo assim, é desejável que, no período mais chuvoso, sejam colhidas áreas cujo escoamento da produção aconteça em um sistema viário com maior percentual de estradas pavimentadas. As janelas de tempo também devem ser ajustadas para que atendam a esta condição.

2.6 Tomada de decisão na cadeia sucroenergética

Conforme visto na seção 2.1.1, a tomada de decisão em sistemas produtivos complexos pode ser dividida de maneira hierárquica com base no horizonte de tempo: estratégico, tático e operacional. Além desta, outra classificação pertinente para a tomada de decisão em sistemas de tomada de decisão na cadeia sucroenergética (seção 2.1) é a divisão entre seus elos principais: a área agrícola, industrial e de distribuição física. Ambas as divisões estão contempladas na Figura 9, que segmenta os processos de tomada de decisão nesta cadeia. Esta segmentação é utilizada para classificar os modelos de planejamento na cadeia sucroenergética obtidos na literatura e mostrados na seção 3.1.

Cabe ressaltar que neste trabalho foram aprofundadas as questões relacionadas à tomada de decisão da área agrícola, sem desconsiderar os processos de tomada de decisão dos outros elos, todavia analisando-os de maneira mais sintética, com ênfase nos aspectos que mais interferem no objeto de estudo deste trabalho.

A tomada de decisão industrial abordada neste estudo está relacionada ao planejamento industrial, que tipicamente parte da quantidade e da qualidade da matéria-prima a ser colhida por período, parâmetros resultantes do planejamento de colheita. A qualidade da matéria-prima é medida principalmente pelo teor de sacarose, que representa o percentual de açúcares cristalizáveis, pelos açúcares redutores totais (ART), que representam os açúcares cristalizáveis e fermentescíveis, bem como o percentual de fibra, que interfere na capacidade de moagem e eficiência da extração (FERNANDES, 2003). Os resultados determinam configurações de processo, levando em conta restrições dos recursos, para que seja atendida a demanda dos produtos finais por período (PAIVA, 2009; PAIVA e MORABITO, 2011; 2013). Em Carvalho (2009) foi tratado o planejamento industrial integrado com a comercialização de produtos, contemplando também operações de *hedge* com os produtos finais.

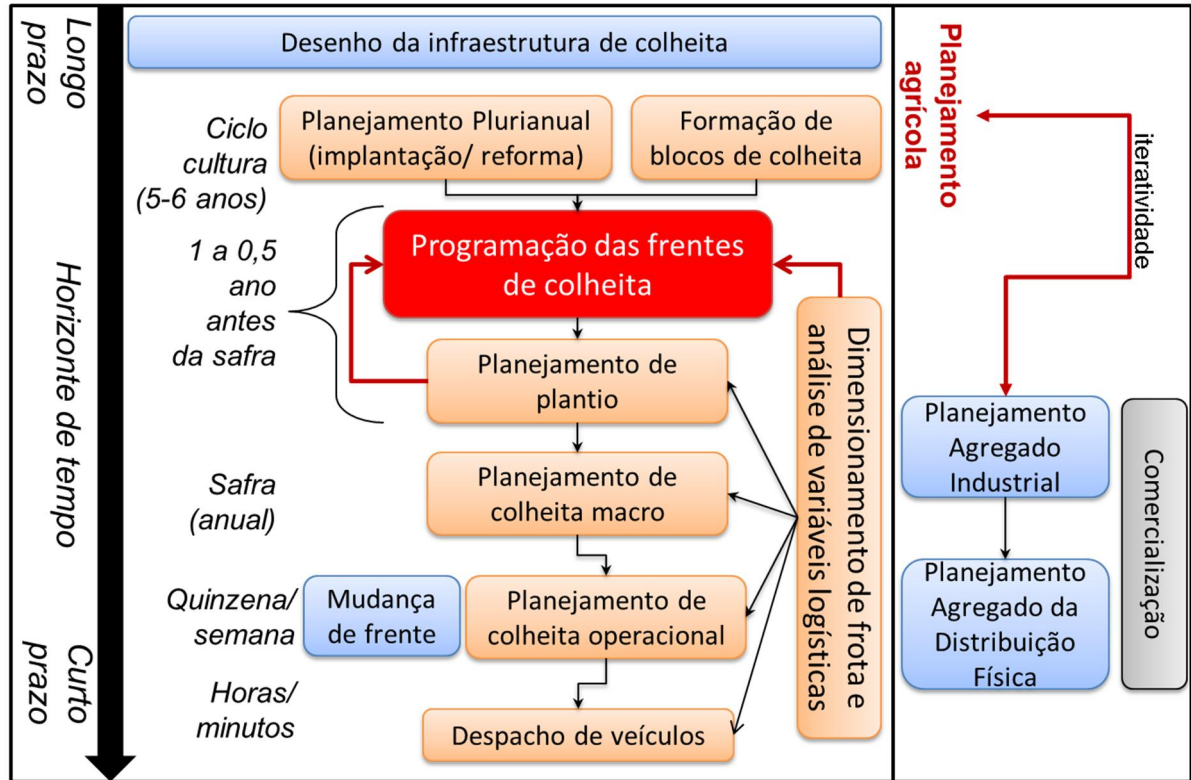


Figura 9: Tomada de decisão na cadeia sucroenergética

A tomada de decisão na distribuição física abordada neste estudo está relacionada ao planejamento agregado da distribuição física, que tipicamente parte do planejamento de produção industrial desmembrado em quantidades produzidas por produto. Está inserido em uma rede que possui mais de uma possibilidade de armazenagem e/ou produção e determina os níveis de estoques e transferências entre depósitos para atender à demanda, levando em conta restrições de transporte e armazenagem (COLIN *et al.*, 1999; KAWAMURA *et al.*, 2006). Em muitos casos, embora a ênfase esteja em um dos elos, o planejamento industrial e da distribuição física são integrados (PAIVA e MORABITO, 2011; KAWAMURA *et al.*, 2006; MELE *et al.*, 2011).

Por fim, as decisões da área agrícola foram analisadas de maneira mais detalhada por ser a base deste estudo e estão esquematizadas juntamente com o planejamento industrial e de distribuição física na Figura 9. Na sua elaboração, foram considerados a análise da cadeia de produção, o conhecimento prévio do processo e a análise da literatura existente sobre o tema. Conforme mostra a Figura 9, as decisões mais estratégicas da área agrícola estão relacionadas ao desenho da infraestrutura de colheita como a determinação da localização de terminais ferroviários na Austrália (HIGGINS; LAREDO, 2006; HIGGINS *et al.*, 2004) ou pontos de consolidação de carga na Tailândia (NEUNGMATCHA *et al.*, 2013).

Como a cana-de-açúcar permite que para cada plantio possam existir cinco cortes, o planejamento plurianual tem por finalidade principal analisar a projeção de plantio e colheita para os próximos cinco a seis anos, determinando as áreas que devem ser renovadas e a época de colheita das mesmas para que atendam a demanda da indústria (BARATA, 1992; HIGGINS, 1999). Um caso especial para este tipo de tomada de decisão é no momento da implantação do canavial, pois quanto menor for o tempo entre o início do plantio e o processamento industrial com capacidade máxima, maior o retorno do negócio (COLIN, 2009).

Como mencionado anteriormente, a unidade básica de área utilizada pela área agrícola é o talhão, porém, para minimizar a perda de capacidade das frentes agrícolas devido às mudanças de áreas, as usinas agrupam talhões próximos e com épocas de colheita semelhantes em blocos de colheita. Esta unidade também é vantajosa para a simplificação dos planejamentos de plantio e colheita. A formação dos blocos trata de métodos para realizar estes agrupamentos (HIGGINS, *et al.*, 2004; HIGGINS; LAREDO, 2006; JENA; POGGI 2013). Na decisão de plantio, a literatura mostra ferramentas com o horizonte de tempo de um a meio ano antes da safra, voltadas para a melhor escolha de variedades a serem plantadas de forma a atender a moagem maximizando atributos qualitativos, como teor de sacarose e palha para a geração de energia elétrica (SARTORI *et al.*, 2001; PIEWTHONGNGAM *et al.*, 2009).

O planejamento de colheita macro é a ferramenta que apresenta maior quantidade de trabalhos na literatura. Além disso, sua prática é frequentemente observada nas usinas por meio de *softwares* de mercado ou planilhas ao menos uma vez por safra. Este tipo de planejamento parte da estimativa de matéria-prima disponível por bloco e busca atender a demanda de moagem da usina desagregada em frentes de colheita, respeitando a área de aplicação de vinhaça, a idade do canavial, bem como a distância média entre as áreas de colheita e a usina. O objetivo é geralmente maximizar a recuperação de açúcares, levando em conta a variedade plantada em cada área, e utiliza como unidade de tempo o mês, quinzena ou semana (BARATA, 1992; HIGGINS, 1999; GRUNOW *et al.*, 2007; LE GAL *et al.*, 2009; STRAY *et al.*, 2012; JENA; POGGI, 2013). Caso o plantio tenha sido realizado com variedades não adequadas ao equilíbrio dos recursos de colheita e transporte com a moagem, o planejamento macro pode se tornar infactível.

Cabe ressaltar que no planejamento de colheita macro há o desmembramento em frentes de colheita, o que usualmente é feito com base no mapa da usina e a quantidade de matéria-prima que cada frente deve processar (vide 2.4). Entretanto, no planejamento macro

de colheita o canavial já está plantado com variedades e período de corte já estabelecidos. No entender deste autor, a programação das frentes de colheita deveria ser considerada antes do planejamento do plantio para que, no planejamento de colheita macro, o planejador possa desfrutar de maior grau de liberdade na decisão do momento de colheita de um bloco, de forma a tornar o desmembramento em frentes de colheita possível em termos operacionais.

Como existe incerteza inerente ao planejamento macro de colheita, o planejamento operacional analisa as datas de colheita dos blocos em um horizonte de tempo mais curto, da ordem de semanas. Este planejamento atende a necessidade de moagem em termos de quantidade e qualidade com os recursos disponíveis, premissas bastante semelhantes ao planejamento macro, mas com unidade de tempo de dia ou momentos do dia (GRUNOW *et al.*, 2007; JENA; POGGI, 2013; MILAN *et al.*, 2006). Dentro deste horizonte de tempo também são analisadas as mudanças de áreas das frentes manuais e mecanizadas considerando os tempos de deslocamento e quantidade de pessoas e/ou equipamentos (GRUNOW *et al.*, 2007; JENA; POGGI, 2013). Cabe ressaltar que se o equilíbrio entre as capacidades de colheita e transporte não foram analisados no planejamento macro, o planejamento operacional pode se defrontar com situações operacionalmente ineficazes.

Por fim, o despacho de veículos (ou liberação de veículos, como preferem alguns autores) apoia o tomador de decisão, tipicamente o controlador de tráfego, a enviar o veículo na frente de colheita em que não haja fila e que mantenha o processo de moagem contínuo (HAHN; RIBEIRO, 1999; MUNDIM, 2009). Neste ponto, os graus de liberdade do controlador de tráfego são muito restritos caso a condição operacional proveniente do planejamento operacional impossibilite a manutenção do fluxo contínuo de suprimento de matéria-prima à unidade fabril.

2.7 Modelo conceitual do problema

Após a leitura das seções anteriores deste capítulo, percebe-se que as operações de colheita e transporte impactam no suprimento de matéria-prima à usina, que deve ser o mais regular possível para evitar falhas à jusante do processo industrial. No entanto, as frentes de colheita não podem ficar em uma só área durante a safra toda, pois a quantidade de cana-de-açúcar disponível é finita em um bloco. Cabe ressaltar que o próprio deslocamento da frente de uma área à outra reduz sua capacidade produtiva.

Assim, as operações de colheita e transporte estão sujeitas às variações de capacidade produtiva inerente às áreas que podem ser equilibradas por meio da sequência de blocos colhidos pelas frentes. Esta variação de capacidade pode ser diferente dependendo da

região da usina, por exemplo, áreas de expansão tendem a ter áreas maiores e com maior facilidade de mecanização do que áreas tradicionais.

A usina também pode ter maior poder de intervenção na definição da sequência de colheita dos blocos pelas frentes, de acordo com o nível de integração vertical à montante ou o tipo de contrato de exploração da área (arrendamento da terra, parceria ou fornecedor). Por outro lado, as janelas de tempo reduzem o poder de intervenção na sequência de colheita dos blocos, que devem ser respeitadas devido a: o período de utilização industrial, a idade do canavial, o risco de incêndio, o risco de inundação, os solos com baixa capacidade de retenção de água e a trafegabilidade das estradas. Além disso, facilidades ao transportar funcionários e prover manutenção dos equipamentos a campo podem determinar regiões geográficas específicas de atuação das frentes (setorização).

Por fim, o nível de intervenção aumenta quando busca equilibrar as capacidades dos recursos de colheita e transporte com a moagem da usina antes do plantio, pois possibilita plantar uma variedade com o período de utilização industrial e a data de plantio adequados à necessidade logística.

O modelo proposto neste trabalho deve, portanto, minimizar o deslocamento das frentes de colheita, ao longo da safra, garantindo o cumprimento das metas de suprimento, equalizando as capacidades de colheita e transporte, atendendo às janelas de tempo, bem como às premissas de setorização das frentes, quando necessárias. Os dados de saída deste modelo devem apoiar as decisões de movimentação das frentes de colheita, além de orientar o tipo de variedade (precoce, média ou tardia) a ser plantada futuramente nos blocos. Ou seja, os resultados sugerem o período que determinado bloco a ser reformado deve ser colhido. Com isso, é possível indicar a variedade que melhor se ajusta às condições da área e ao período de colheita sugerido. Além disso, os dados de saída deste modelo podem validar o dimensionamento de colhedoras e caminhões propostos para a safra, pois as capacidades de colheita e transporte são analisadas com as quantidades destes recursos parametrizadas, para a colheita das áreas nos períodos sugeridos.

3 Revisão da literatura e fundamentação teórica

Neste capítulo são revisados os temas-chave para a fundamentação teórica e o desenvolvimento do modelo proposto utilizando-se as ferramentas de busca *online*: *Science Direct*, *Scopus*, *Google Scholar*, banco de teses da Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade de Campinas (Unicamp), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) e Universidade Federal de Goiás (UFG).

Na seção 3.1 são resumidamente revisados os modelos de planejamento e controle encontrados na literatura e relacionados à produção de cana-de-açúcar, bem como os métodos usuais utilizados nas usinas. Já na seção 3.2 é feita uma breve consideração sobre a revisão da literatura de VRP, uma possível abordagem para o modelo proposto. A seção 3.3 revisa os modelos e métodos de resolução de dimensionamento e sequenciamento de lotes da literatura, principal base para o desenvolvimento do modelo proposto. Por fim, a seção 3.4 apresenta métodos de validação de modelos presentes na literatura.

3.1 Modelos de planejamento e controle em usinas de cana-de-açúcar

Para a busca por referências neste tema foram utilizadas as palavras-chave: modelos de planejamento de colheita de cana-de-açúcar, *sugarcane harvest planning models*, logística de colheita de cana-de-açúcar e *sugarcane harvesting logistics*; para o período de 1990 a 2013. Após as buscas iniciais, houve iteratividade especificando referências dos pesquisadores mais recorrentes, no caso Higgins e Le Gal, bem como dos trabalhos com maior proximidade com o tema, no caso Jena e Poggi (2013) e Grunow *et al.* (2007). Também foram pesquisados os últimos volumes dos periódicos com maior recorrência, no caso *Computers and Electronics in Agriculture*, *Agricultural Systems* e *European Journal of Operational Research*. Publicações em congressos como do *Proceedings of the South African Sugar Technology Association* foram consideradas relevantes por serem específicos da área. Alguns trabalhos mais antigos, mas referenciados com frequência foram incluídos também, como Guise e Ryland (1969) e Vijayalakshmi (1987).

Desta busca, 55 trabalhos relevantes foram encontrados e categorizados de acordo com:

- ✓ A proposição de um ou mais modelos dentro do esquema mostrado na Figura 9 da seção 2.6 (desenho da infraestrutura de colheita, planejamento plurianual, formação de blocos de colheita, planejamento de plantio, planejamento de colheita

macro, planejamento de colheita operacional, despacho de veículos, dimensionamento de frota e análise de variáveis logísticas, planejamento agregado industrial, planejamento agregado da distribuição física e revisão da literatura).

- ✓ O método de modelagem (programação linear, programação inteira mista, programação quadrática, simulação de eventos discretos e simulação determinística).
- ✓ O método de solução (pacotes computacionais e de otimização, métodos heurísticos, métodos meta-heurísticos, *software* MAGI e método de Khun-Tucker).
- ✓ A abordagem (proposição de modelo ou aplicação de modelo).

Destes trabalhos, 41 estão relacionados à área agrícola, oito à área industrial, quatro à distribuição física dos produtos finais e dois são de revisão bibliográfica. A Tabela 1 mostra a quantidade de publicações por ano e país. Nela pode-se observar que 16 trabalhos foram feitos nos últimos cinco anos, com especial destaque para 2009. Além disso, o Brasil possui maior número de trabalhos, seguido da Austrália e África do Sul.

Tabela 1: Número de publicações por país e ano

	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1996	1994	1992	1987	1969	Total	
Brasil	1	1	2	1	7	1		3		1			1	1	2		1		1			23	
Austrália								2	2	3	1	1			1	1						1	12
África do Sul			1		1	2					2												6
Tailândia	1				1														1				3
Global					1		1																2
África do Sul/Réunion						1					1												2
Índia																					1		1
Japão					1																		1
México														1									1
Argentina			1																				1
Venezuela							1																1
Cuba								1															1
EUA												1											1
Total	2	2	3	1	11	4	2	6	2	4	4	2	2	1	3	1	1	1	1	1	1	1	55

Com exceção dos trabalhos de revisão bibliográfica, os trabalhos apresentam proposições de modelos científicos (46 trabalhos) ou aplicação (sete trabalhos) de modelo proposto na literatura. Por meio da análise dos trabalhos mais relevantes ao tema, destacaram-se os autores em termos de quantidade de publicações na área agrícola: Higgins (12 trabalhos) e Le Gal (sete trabalhos). A Tabela 2 mostra o número de publicações por revista ou instituição de pesquisa. Nela pode-se observar que as revistas *Computers and Electronics in Agriculture*, *Agricultural Systems* e *European Journal of Operational Research* lideraram a quantidade de publicações qualificadas.

Higgins *et al.* (2007) fizeram uma revisão bibliográfica de trabalhos relevantes desta temática e sugeriram que há grande valor em trabalhos que transcendem a questão técnica, modificando o comportamento dos agentes do sistema agroindustrial. Além disso, ponderaram que, embora seja interessante ter processos enxutos, também era relevante a agilidade destes processos. Bezuidenhout e Baier (2009) também fizeram uma revisão mais ampla de trabalhos relacionados aos sistemas de produção de cana-de-açúcar integrados e ressaltaram uma preocupação com soluções estratégicas, de longo prazo, como infraestrutura, desenvolvimento de novas variedades e diferentes arranjos entre fornecedores de matéria-prima.

Tabela 2: Número de publicações por revista ou instituição de pesquisa

	Publicações
Computers and Electronics in Agriculture	9
Agricultural Systems	6
European Journal of Operational Research	5
Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.	5
Dissertação ESALQ-USP	3
Journal of the Operational Research Society	2
Interfaces	2
Ann Oper Res	2
Produção	2
Dissertação UFSCar	2
Gestão & Produção	2
Field Crops Research	1
Revista Investigacion Operacional	1
Energy	1
Dissertação PUC-RJ	1
Tese UFSCar	1
I&EC research	1
Pesquisa Agropecuária Tropical	1
Dissertação UFG	1
Dissertação Poli	1
International Journal of Production Economics	1
Australian Journal of Agricultural Economics	1
Intl. Trans. in Op. Res.	1
Transportation Research Part E	1
Journal of Scheduling	1
Australian Journal of Agricultural Research	1
Total	55

Nas subseções seguintes, são discutidos vários tipos de modelos de planejamento e controle da produção de cana-de-açúcar da literatura que contribuem para a reflexão e construção do modelo proposto neste trabalho, organizados de acordo com na Figura 9 da seção 2.6, estando nas últimas seções as abordagens que possuem maior afinidade com este trabalho. Na seção 3.1.10 são apresentados dentro de cada categoria os *softwares*

comerciais encontrados nesta pesquisa em utilização em usinas brasileiras. Por fim, a seção 3.1.11 identifica a lacuna na literatura em que o presente trabalho se insere.

3.1.1 Planejamento industrial e distribuição física

Conforme mencionado na seção 2.6, o resultado do planejamento de colheita, que é a quantidade de cana entregue na usina com determinado nível de qualidade e potencial de recuperação de açúcares, é um dado de entrada importante para o planejamento industrial e distribuição física. Assim, como foi enfatizado anteriormente, estes estudos são foco do presente trabalho, mas por possuírem tal interface merecem ser mencionados. Estes trabalhos são apresentados em dois grupos: primeiramente os que enfatizam o planejamento industrial e em seguida os relacionados à distribuição física de maneira cronológica.

Paiva (2006), Paiva e Morabito (2009 e 2013) utilizaram um modelo de programação inteira mista de seleção de processos para maximizar a receita agroindustrial. Paiva (2009) e Paiva e Morabito (2011) utilizaram técnicas de otimização robusta para realizar o planejamento agregado de usinas cooperadas na região Nordeste do Brasil. Carvalho (2009) propôs a utilização do modelo de semi-variância de Markowitz para tratar a escolha do mix de produção (quanto de açúcar e álcool), considerando os preços nos mercados interno, externo e futuro, além de outras variáveis como o fluxo de caixa da empresa e as capacidades de produção e armazenagem.

Vijayalakshmi (1987) propôs um modelo de programação linear para apoiar na definição de políticas públicas na Índia em termos de atendimento de demanda de açúcar, aumento de postos de trabalho e níveis de investimentos. Também analisando políticas públicas, Yoshizaki *et al.* (1996) estudaram a descentralização da distribuição física do etanol na região sudeste do Brasil por meio de um modelo de programação linear de fluxo em redes com transbordamento.

Colin *et al.* (1999) analisaram a distribuição de açúcar para uma rede de depósitos a partir da produção de uma usina. Para isso utilizaram um modelo de programação linear de fluxo em rede operando em paralelo com o sistema de tomada de decisão de uma empresa e verificaram considerável redução de custo. Kawamura *et al.* (2006) aplicaram um modelo de programação linear multi-período para coordenar a produção de usinas de cana-de-açúcar cooperadas no estado de São Paulo.

Xavier (2008) desenvolveu um modelo de programação inteira mista para analisar a rede de estocagem de álcool existente no Brasil e propor a instalação de novos tanques visando a redução de custos de distribuição. Mele *et al.* (2011) abordaram a

maximização econômica e ecológica de uma rede de usinas com as respectivas áreas agrícolas, as instalações de armazenagem de açúcar e álcool disponíveis, bem como os mercados finais de açúcar, álcool e energia.

3.1.2 Desenho da infraestrutura de colheita

O primeiro trabalho relacionado a esta categoria foi apresentado em Salassi *et al.* (2002) que propõem um modelo de programação inteira mista para determinar a fração ótima entre colheita mecanizada e colheita manual em uma fazenda no estado de Lousiana nos Estados Unidos da América, com base em dados de produtividade e recuperação de açúcares levantada por dados estatísticos. Como se baseia na análise de apenas uma fazenda, ao invés de várias fazendas que compõem a área operacional da usina, este trabalho não se aplica ao modelo conceitual deste estudo. Além disso, particularmente, na região Centro-Sul do Brasil, devido à legislação de proibição de queimadas, bem como o encarecimento e escassez da mão-de-obra, a área só não seria colhida mecanicamente quando há algum impedimento de relevo, presença de pedras, dentre outros fatores.

Outros trabalhos relacionados a este tipo de problema, como Higgins *et al.* (2004b) e Higgins e Laredo (2006), estão situados no contexto australiano e associados com a localização de terminais de serviço ferroviários, ou seja, o ponto em que a cana colhida é transbordada a vagões posteriormente recolhidos pelo trem. Para isso os autores utilizaram o problema das p -medianas que consiste em localizar p -instalações de tal forma que minimize a distância média de seus clientes às p -instalações. No estudo, os clientes corresponderiam às áreas de colheita e a instalação seria um terminal de serviço ferroviário. Este problema de programação inteira mista foi resolvido por meio de uma heurística de busca em vizinhança. Os autores consideram o modelo descrito anteriormente e um modelo de simulação estocástica para desenvolver um planejamento de capacidade integrando os pontos de transbordo com a demanda da usina e dimensionando o número de locomotivas necessárias. Higgins e Laredo (2006) propuseram uma modificação no modelo original com duas funções objetivos: uma minimizando a distância média ponderada entre as áreas e os pontos de transbordo e a segunda minimizando o custo de transporte.

Estes tipos de abordagem são voltados para sistemas de transporte que necessitam implantar estruturas fixas como um terminal ferroviário, amplamente utilizado na Austrália e em Cuba. Já o presente trabalho, voltado ao contexto brasileiro que se baseia no modo de transporte rodoviário, considera as frentes de colheita como estruturas com

mobilidade e, desta maneira, descarta-se a utilização do modelo com p -medianas para representar o problema.

Neungmatcha *et al.* (2013) propuseram um modelo de programação inteira mista, no contexto Tailandês, para localizar pontos de carregamento, onde os pequenos fornecedores concentram a cana com recursos de colheita e transporte deles e carregam os veículos próprios da usina com maior capacidade de carga. O modelo também escolhe o tipo de carregador em função dos custos de aquisição e operação. O método de resolução utilizado é um algoritmo genético adaptativo. Neste caso também, o modelo não se aplica ao estudo em questão, pois nas usinas típicas do Brasil, mesmo quando há pequenos fornecedores, o sistema de consolidação de carga descrito não é usual.

3.1.3 Avaliação de cenários de colheita e transporte utilizando simulação

Percebe-se que na literatura também são aplicadas técnicas de simulação de eventos discretos em sete trabalhos encontrados. Neste tipo de abordagem, são criados modelos alimentados por variáveis aleatórias e determinísticas com o objetivo de testar cenários reais sob condições de incertezas. Assim como nas seções 3.1.1 e 3.1.2, este tipo de estudo não impacta diretamente no presente trabalho, mas possui interface com ele. Na maior parte destes trabalhos, são avaliadas variáveis como o dimensionamento de frota ou análise de variáveis envolvidas no sistema de suprimento de cana-de-açúcar. Estes trabalhos estão agrupados nesta seção por país e cronologia.

No México, foi modelado todo o processo de colheita e transporte, buscando analisar as políticas de amortização de equipamentos com base na utilização dos mesmos (ARJONA *et al.*, 2001). Na Austrália, foram encontrados estudos que apoiam decisões do número de locomotivas e turnos das mesmas, utilizados no transporte de cana, número de vagões necessários e os atrasos na colheita resultantes dos atrasos da chegada de vagões vazios (HIGGINS; DAVIES, 2005 e HIGGINS; LAREDO, 2006). Na África do Sul, Le Gal *et al.* (2009) utilizaram um simulador de eventos discretos para analisar o dimensionamento de equipamentos de colheita e transporte com base em planejamento de colheita macro.

No Brasil, foram estudados por este tipo de abordagem o comportamento do descarregamento de caminhões canavieiros em uma usina de grande porte no interior de São Paulo (IANONI, 2000; IANONI; MORABITO, 2006), e, em outro trabalho no interior do estado de São Paulo, o comportamento do suprimento de cana quando se escalona o horário de troca de turno das frentes de colheita (SILVA *et al.*, 2011). Neste mesmo contexto, Mundim (2009) desenvolveu um modelo de simulação de eventos discretos para dimensionar

a frota em uma usina de açúcar e álcool. Utilizou este modelo para analisar o despacho dinâmico para as frentes de colheita e também a viabilidade econômica de se manter estoque sobre rodas no campo. Bastos (2009) estuda uma usina no estado de Goiás, analisando variáveis relacionadas à logística de colheita e transporte para melhorar regularidade no suprimento de matéria-prima na unidade fabril.

3.1.4 Sequenciamento e despacho de veículos

Assim como nas seções anteriores, este tipo de estudo não impacta diretamente no presente trabalho, mas possui interface com ele, pois se trata das consequências do seu desmembramento. Singh e Pathak (1994) utilizam os custos de depreciação, capital, manutenção, combustível, lubrificação, mão-de-obra e impostos dos equipamentos para decidir o sequenciamento do veículo à frente de colheita na Tailândia, bem como o dimensionamento de veículos. Outro algoritmo de sequenciamento apresentado por Hahn e Ribeiro (1999) consiste em uma heurística que considera o número equipamentos disponíveis, como os caminhões de cada tipo, as colhedoras, carregadoras e os tratores, bem como a meta de entrega de cana de cada frente de colheita. O objetivo deste algoritmo, testado em uma usina de porte médio do Brasil, é reduzir o tempo de espera do caminhão na frente de colheita, reduzindo-se, assim, a frota necessária.

Higgins (2006) propôs um modelo de programação e sequenciamento para uma usina na Austrália que determina quais caminhões transportarão as unidades de carga disponíveis após o término do carregamento das mesmas. O objetivo do modelo é estipular uma programação e sequenciamento do envio dos caminhões que minimize o tempo de espera na usina, bem como evitar falhas de suprimento. O problema foi resolvido com heurísticas de Busca Tabu e busca em vizinhança variável.

Embora a programação e o sequenciamento do envio de caminhões consigam alcançar bons resultados como mostra a literatura, ele se mostra frágil quando a disponibilidade de colhedoras, carregadoras e tratores não possui grande previsibilidade, podendo gerar grandes filas na frente de colheita. Assim, os algoritmos de despacho com alimentação de dados em tempo real são largamente utilizados pelas usinas brasileiras por possibilitarem analisar a disponibilidade dos equipamentos das frentes de colheita, sua capacidade de produção e enviar caminhões de maneira dinâmica. Estas ferramentas são oferecidas por *softwares* de mercado que são detalhados na seção 3.1.10.

3.1.5 Formação de blocos de colheita

Como descrito anteriormente, Higgins *et al.* (2004b) e Higgins e Laredo (2006) utilizaram também um modelo para agregar as áreas em grupos de colheita, considerando uma restrição com a capacidade de processamento dos grupos, buscando minimizar a distância entre a área e o centro do grupo de colheita. Para a solução deste modelo de programação inteira com função objetivo não linear, foi utilizada uma meta-heurística de Busca Tabu. Apesar deste modelo ter sido empregado para a localização de terminais ferroviários, ele pode ser considerado para a formação de blocos de colheita.

Barata (1992) também propôs um método de formação de blocos de colheita baseado no agrupamento dos talhões com as seguintes características semelhantes: variedades cultivadas, estágio de corte, tipo de solo, distância à unidade processadora, data do último corte ou plantio, tratos culturais, dentre outros. Jena (2009) também propôs um método semelhante ao de Barata (1992), todavia agrupando talhões com as seguintes características:

- ✓ A distância entre eles é menor que um quilômetro.
- ✓ Os valores de pol, ar e fibra são iguais (veja seção 2.3).
- ✓ Todos podem ser colhidos nos mesmos dias.
- ✓ Todos podem ser colhidos pela mesma frente de colheita.

A produção do bloco é formada pela soma da produção dos talhões. Jena e Poggi (2013) enfatizaram que a utilização deste método foi fundamental para o bom desempenho do modelo utilizado. Acredita-se também que no presente trabalho esta abordagem seja de grande importância para poder reduzir o número de variáveis inteiras, tornando o modelo tratável.

3.1.6 Planejamento plurianual (implantação/reforma)

Foram encontrados seis estudos que abordam este tema. Dentre eles, cinco relacionados à colheita e reforma e, destes cinco, três propõem modelos matemáticos. Dos modelos propostos, dois são baseados em programação linear e um no problema de atribuição geral, que é um modelo de programação inteira mista. O estudo que trata da implantação do canavial utiliza um modelo de programação não linear.

3.1.6.1 Programação linear

Problemas de programação linear são modelos cuja função objetivo e as restrições são lineares. Sua resolução é bastante eficiente por meio do método Simplex, ou métodos de pontos interiores. Devido à sua simplicidade e facilidade de processamento,

vários autores buscaram realizar o planejamento da colheita da cana-de-açúcar. Problemas de planejamento de colheita e reforma foram resolvidos lidando com um horizonte de longo prazo, por meio deste tipo de abordagem, no contexto brasileiro por Barata (1992) e no contexto australiano por Higgins *et al.* (1998). Estes modelos decidem quando colher cada talhão, buscando otimizar a receita agrícola com base na recuperação de açúcares, sujeito a restrições de capacidade de processamento industrial e de transporte e replantar, levando em conta a perda de produtividade do canavial a cada corte, bem como os custos envolvidos. Em ambos os estudos, os modelos foram resolvidos com base em pacotes computacionais.

Embora estes modelos consigam lidar com um número grande de variáveis e restrições com eficiência, não há qualquer tipo de penalidade ao colher parte de um bloco e mudar para outro bloco distante deste, ou seja, não é penalizado o deslocamento da frente de colheita. Quando há mudanças muito frequentes das frentes de colheita, perde-se temporariamente capacidade de colheita. Caso haja outra frente com capacidade excedente, ou mesmo o estoque na usina seja suficiente para suprir esta deficiência, é possível fazer um remanejamento; caso contrário, há ruptura no fornecimento de matéria-prima.

3.1.6.2 Programação inteira mista

Já o *Generalized Assignment Problem* (GAP) é um problema de modelagem discreta em que há m agentes e n tarefas, sendo que há mais tarefas que agentes, cada tarefa é executada por um único agente e um agente pode realizar mais de uma tarefa. Toda tarefa executada por um agente possui um custo e requer o gasto de um recurso limitado. O objetivo é reduzir o custo total de execução das tarefas (CATTRYSSSE; WASSENHOVE, 1992).

Higgins (1999) apresentou um modelo de programação inteira de grande porte inspirado em um GAP. Neste caso, os recursos limitados seriam a capacidade de transporte, colheita e moagem da usina. Este modelo tem por objetivo determinar a data de corte, o número de cortes da cana e as áreas de reforma que maximizem a margem de contribuição da colheita das áreas. Ele possui um horizonte de tempo de longo prazo, englobando vários anos de planejamento. Para sua resolução, utiliza uma heurística para resolver o problema com porte de 500.000 variáveis. Outras aplicações deste modelo no contexto australiano podem ser encontradas na literatura (HIGGINS; MUCHOW, 2003), em que os autores testam hipóteses alterando as cotas dos fornecedores. Em outro estudo, este mesmo modelo foi implementado em usinas australianas por meio da atuação direta dos pesquisadores (HIGGINS *et al.*, 2004a).

Embora restrições como a capacidade de transporte e colheita sejam consideradas neste modelo, elas não estão relacionadas à área de colheita. Além disso, a

divisão das frentes de colheita está ligada aos pontos de transbordo da ferrovia. Ou seja, cada pequeno produtor carrega o vagão de cana no ponto de passagem do trem. Este processo é bastante diferente daquele realizado nas frentes de colheita brasileiras tratadas neste trabalho.

3.1.6.3 Programação não linear

Ainda relacionado com o planejamento plurianual, Colin (2009) apresentou um modelo de programação quadrática que propõe um plano de implantação do canavial, considerando áreas de viveiro para replicação e uma perda gradativa de produtividade da cana a cada ano. Em projetos de novas usinas, ele busca acelerar a quantidade de cana disponível para o processamento em escala econômica, adiando ou antecipando a reforma do canavial, mas buscando manter a estrutura de plantio constante.

3.1.7 Planejamento de plantio

Embora o escopo do planejamento de reforma integrado ao planejamento de colheita tenha intersecções com o planejamento de plantio, no presente trabalho, conforme mencionado na seção 2.6, este tipo de planejamento é considerado aquele que se preocupa em definir a variedade de cana a ser plantada em determinada área. Os estudos encontrados na literatura foram modelados por meio de programação linear e resolvidos por meio de pacotes computacionais.

Com o aumento no interesse na produção de energia elétrica a partir da cana-de-açúcar, Sartori *et al.* (2001) propuseram dois modelos no contexto brasileiro. O primeiro escolhe as variedades a serem plantadas de forma a minimizar o total de resíduos nas áreas, mantendo um mínimo de teor de sacarose e um mínimo de produção de energia. O segundo visa maximizar a quantidade de energia obtida, mantendo um mínimo de teor de sacarose e um mínimo de resíduos.

Na Tailândia, Piewthongngam *et al.* (2009) propuseram um modelo de planejamento de cultivo para coordenar o plantio de fornecedores de cana de uma usina. O modelo sugere a variedade e a época do ano a ser plantada que maximiza o teor de sacarose, sem extrapolar a quantidade de área disponível para plantio e atendendo as premissas de moagem da usina. Além do modelo de otimização, os autores propõem que seja repensado o processo de plantio, que é bastante relevante neste estudo. Ao invés de plantar e depois planejar a colheita, defendem que o modelo seja também utilizado para verificar as variedades a serem plantadas em cada área. Depois disso, acontece o plantio e se planeja a colheita.

Da mesma forma, no presente trabalho defende-se que a programação das frentes de colheita seja simulada e analisada antes do plantio. Com base nesta análise, e conhecendo a época de colheita e o ambiente de produção de cada área, a equipe agrônômica escolheria as variedades que seriam plantadas.

3.1.8 Planejamento de colheita macro

Além de cinco estudos voltados ao planejamento plurianual, que também podem ser utilizados para realização deste tipo de planejamento, foram encontrados mais 18 trabalhos voltados ao planejamento de colheita macro. Dentre os 18, dois são de programação não linear, sete de simulação determinística, dois de modelos de programação linear e sete utilizam programação inteira mista.

3.1.8.1 Programação não linear

Guise e Ryland (1969) propuseram um método de programação quadrática que considera a capacidade industrial, os custos de produção, bem como as margens de contribuição para a produção de açúcar. Com isso, analisaram os momentos de início e término da safra para a obtenção da melhor rentabilidade possível. Já Jiao *et al.* (2005) propuseram um modelo de programação quadrática com variáveis reais e restrições lineares, resolvido por meio do pacote computacional GAMS com o solver OSL 3. A função objetivo busca maximizar o teor de sacarose e o modelo obtém a proporção que cada fazenda deve produzir em um determinado período.

Apesar de possuírem conceitos pertinentes como a determinação do tamanho da safra e a proporção que cada fornecedor deve produzir, várias premissas contidas no modelo conceitual deste trabalho, vide seção 2.7, não estão contempladas nestes estudos.

3.1.8.2 Simulação determinística

O MAGI é um pacote computacional apresentado em Le Gal *et al.* (2003) e simula o fornecimento de cana anual com base semanal, considerando restrições de produção agrícola, de capacidade industrial, capacidade de transporte e colheita, bem como o impacto da curva de maturação na receita dos agentes envolvidos. A simulação possui duas etapas: a primeira compara semanalmente a recuperação de açúcar ao longo da safra e a segunda verifica a viabilidade desta programação em termos de capacidade de colheita e transporte (GAUCHER *et al.*, 2003, LE GAL *et al.*, 2009). Este *software* foi utilizado para avaliar o sequenciamento de colheita na África do Sul (LE GAL *et al.*, 2008).

Outras aplicações deste *software* em duas usinas em Réunion e na África do Sul mostraram que o zoneamento de áreas baseado nas características de qualidade pode trazer importantes benefícios para aumentar a recuperação de açúcares (GUILLEMAN *et al.* 2003; LEJARS *et al.*, 2008). Utilizando uma abordagem com o MAGI em conjunto com simulação de eventos discretos, Le Gal *et al.* (2008) estudaram um caso na África do Sul considerando as variáveis: o percentual de mecanização, o tamanho da safra e a capacidade de moagem da indústria. Do que foi possível analisar dos estudos envolvendo o MAGI, trata-se de um pacote computacional baseado em um modelo de simulação determinística que não analisa a otimização no sequenciamento das frentes de colheita.

3.1.8.3 Programação linear

Caliari *et al.* (2004) implementaram um modelo de programação linear em *Excel* utilizando o solver *Xa Callable Library* versão 12.0 e o aplicam a uma usina brasileira do norte do estado do Paraná para o horizonte de tempo de uma safra e com a unidade de tempo em semanas. As frentes de colheita são previamente definidas, tendo como função objetivo a maximização do teor de sacarose e considerando as áreas de maturadores e vinhaça. Scarpari e Beauclair (2010) também utilizaram um modelo de programação linear resolvido em GAMS e o aplicaram a uma usina brasileira no interior do estado de São Paulo também para o horizonte de tempo de uma safra e com a unidade de tempo em mês. Os autores também consideraram as decisões do tipo de colheita (manual ou mecanizada) e do tipo de caminhão (rodotrem ou treminhão) para a colheita de determinada área. Foram consideradas como restrições as capacidades de colheita, carregamento e transporte.

As limitações deste tipo de abordagem são semelhantes às apontadas na seção 3.1.6 para modelos de programação linear no planejamento plurianual. Se for desmembrar em frentes de colheita, demandam uma definição prévia de suas áreas de influência.

3.1.8.4 Programação inteira mista

Higgins (2002), no contexto australiano, apresentou um modelo de programação inteira mista, resolvido por meio de uma meta-heurística de Busca Tabu, para determinar um padrão de entrega de matéria-prima de fornecedores à usina de maneira equilibrada. O autor faz uma analogia com o problema de escalonamento de enfermeiras, que é uma variação do GAP, em que são determinados os turnos e feriados que as enfermeiras devem trabalhar e que proporcione maior eficiência. Neste modelo, é utilizada uma função multi-objetivo que considera: as entregas diárias e antecipadas à usina, bem como a utilização

do terminal ferroviário, das locomotivas e do sistema viário. As restrições incorporam as jornadas de trabalho e dias de trabalho de cada fornecedor, bem como a compatibilidade tecnológica dos fornecedores que entregam em um mesmo terminal. Higgins e Postma (2004) apresentaram um modelo com propósitos semelhantes a Higgins (2002); todavia enfatizaram restrições de capacidade dos terminais e minimizaram na função objetivo a violação deste tipo de restrição. Cabe ressaltar que, no contexto brasileiro, este tipo de abordagem não se aplica ao conceito de frentes de colheita trabalhando 24 horas e todos os dias de safra.

Já Guan *et al.* (2009) propuseram um modelo para determinar o sequenciamento de operações agrícolas em uma fazenda no Japão, envolvendo o dimensionamento de equipamentos, a carga de trabalho e a reforma do canavial. Para a resolução deste problema, foi desenhada uma rede Petri-híbrida e desenvolvida uma meta-heurística de duas fases com base num algoritmo de *simulated annealing*, que otimiza a atribuição de recursos, e num algoritmo genético, que elabora a lista de prioridades.

Stray *et al.* (2012) propuseram um interessante modelo baseado no problema do caixeiro viajante assimétrico com custos dependentes do tempo. O modelo proporciona uma sequência de colheita e visa maximizar a rentabilidade das áreas colhidas. O modelo foi implementado no *software* Lingo e também elaborada uma meta-heurística de Busca Tabu. Entretanto, apesar da analogia utilizada por estes autores ser próxima da abordada neste estudo, o modelo não trata as frentes de colheita, como também não analisa o equilíbrio das capacidades de colheita e transporte, bem como o atendimento da demanda industrial, que também não foi analisado por Guan *et al.* (2009).

Grunow *et al.* (2007) propuseram um modelo de programação inteira mista utilizando o pacote de otimização OPL Studio 3.6.1 com o solver CPLEX 8.1. Este modelo trata a unidade de tempo em semanas e tem como objetivo uma função minmax que determina o mínimo período de safra com a máxima a recuperação de açúcares. Além disso, são consideradas janelas de tempo para a colheita das áreas, bem como as restrições de capacidade de transporte, de colheita manual e mecanizada.

Jena (2009) e Jena e Poggi (2013) propuseram um modelo de programação inteira mista para determinar quais áreas serão colhidas por semana, se utilizará maturadores e se os utilizar, indica a época da aplicação. A função objetivo é maximizar a margem de contribuição, estando do lado da receita a recuperação de açúcares e do lado das despesas os custos industrial, de aplicação de maturador, de colheita e transporte. As restrições incluem respeitar a capacidade de colheita das frentes, a capacidade de moagem, a capacidade de transporte, a perda de produtividade devido à aplicação de maturadores, à idade mínima de

corde, à máxima quantidade de açúcares transportada, ao percentual mínimo de fibra da cana, à redução da capacidade de corte nos finais de semana e feriados e, por fim, à aplicação de vinhaça.

Embora os dois últimos modelos apresentem características mais próximas ao estudado nesta tese, não consideram a penalização da perda de capacidade de colheita ao mudar as frentes de colheita. Além disso, por mais que considerem as restrições de capacidade da frente de corte, não as caracterizam com atributos da área de colheita.

3.1.9 Planejamento operacional de colheita

O planejamento operacional de colheita foi abordado, segundo as considerações da seção 2.6, em quatro trabalhos envolvendo programação inteira mista. Milan *et al.* (2006) propuseram um problema de programação inteira mista para a determinação de um plano operacional de colheita com um horizonte de planejamento semanal e a unidade de tempo em horas. O modelo foi aplicado em uma usina localizada em Cuba, em que o transporte de cana utiliza os modos ferroviário e rodoviário. A função objetivo visa minimizar o custo de transporte e são consideradas restrições às metas de moagem, a capacidade de armazenagem das instalações, a capacidade de transporte, a capacidade de colheita e as horas trabalhadas das frentes de colheita manual e mecanizada. Os autores tentaram resolver o modelo completo no *software* HyperLINDO, mas não foram bem sucedidos em 200 horas de execução. Foi possível resolver através de bibliotecas do ILOG CPLEX.

Grunow *et al.* (2007) também propuseram um modelo de programação inteira mista aplicado a uma usina na Venezuela, com o horizonte de tempo de algumas semanas. O objetivo é minimizar os custos de perda de moagem, estoques de matéria-prima não processados no dia, colheita e transporte de cana-de-açúcar. O modelo decide em qual dia determinada fazenda começa a colheita (mecanizada ou manual), o número de caminhões necessários em cada dia, toneladas de cana perdidas por redução de moagem em cada dia e estoque de passagem em cada dia. São utilizadas as restrições de número de caminhões disponíveis, capacidade de colheita, bem como balanço entre moagem e redução de moagem. O modelo foi resolvido utilizando o pacote ILOG's OPL Studio 3.6.1 com o solver CPLEX 8.1. Esses autores comentaram sobre outra ferramenta integrada que programa as mudanças de frentes manuais e mecanizadas, sem detalhá-la no estudo.

Jena (2009) e Jena e Poggi (2013) propuseram um modelo de programação inteira mista aplicado a uma usina brasileira, com um horizonte de tempo de 30 dias e tratamento multiunidades. O objetivo é maximizar a margem bruta, que inclui a receita com

venda de açúcar menos os custos com colheita, transporte de matéria-prima e transporte das frentes de colheita. As restrições consideram a quantidade de matéria-prima disponível no campo, as capacidades de moagem, colheita e transporte. O modelo considera instantes do dia para tratar a mudança das frentes mecânicas e de corte manual com seus respectivos turnos de trabalho. Como parte da resolução, os autores fizeram pré-processamento considerando a agregação em blocos de colheita e excluíram distâncias entre blocos muito grandes; utilizaram uma heurística construtiva gulosa para acelerar o início do processamento; utilizaram inequações válidas para acelerar a convergência para a solução ótima.

Com exceção do modelo proposto por Milan *et al.* (2006), que trataram de um contexto híbrido de rodovia e ferrovia, os outros trabalhos apresentados nesta seção são bastante próximos do que está sendo proposto neste estudo. Consideraram as capacidades de moagem, de colheita e de transporte. De um lado, Jena (2009) e Jena e Poggi (2013) consideraram o tempo perdido com o deslocamento das frentes e, por outro lado, Grunow *et al.* (2007) consideraram o custo da perda de moagem e a capacidade de colheita e transporte por área. No entanto, não seria possível utilizar uma combinação destes modelos para o problema de pesquisa, primeiramente, porque trataram a unidade de tempo em dias e instantes do dia, com um horizonte de tempo curto, que não é adequado ao modelo conceitual apresentado. Além disso, se o modelo for extrapolado para o horizonte de tempo, a eficiência em sua resolução pode ser comprometida.

3.1.10 Softwares de mercado

Os principais fornecedores de *softwares* no mercado brasileiro são as empresas Empresa α , Empresa β e Empresa γ . A Empresa γ apresenta um *software*, com as premissas bastante semelhantes ao modelo proposto por Barata (1992), para o planejamento plurianual, chamado de reforma e plantio, compartilhando os mesmos benefícios e limitações. Para o planejamento de colheita macro, apresenta um modelo com características similares, porém simplificado. Considera a capacidade da indústria, a idade do canavial, o balanceamento energético da indústria em termos de fibra, as características das variedades disponíveis, a disponibilidade das frentes de colheita e a distância máxima das frentes. O sistema de controle de tráfego, chamado de gestão logística, indica automaticamente a frente de colheita que o caminhão deve ir de acordo com a capacidade de colheita da frente e a meta de entrega para a usina.

Já a Empresa β apresenta três ferramentas integradas: os módulos de reforma, de plantio e de colheita. O módulo de reforma trata o plantio de maneira bem agregada,

analisando expansões em um horizonte de 10 a 20 anos. Já o módulo de plantio está voltado para um horizonte de tempo de 5 a 6 anos e trabalha com variáveis mais desagregadas. O módulo de colheita apresenta o planejamento macro de colheita de uma safra. Os módulos são bastante flexíveis ao incorporar restrições e considerar variáveis a serem otimizadas. Entretanto, as restrições recebem prioridades para o seu atendimento e podem não ser atendidas, ou seja, dependendo da forma de o decisor estabelecer as restrições e os pesos dessas restrições, o modelo pode gerar soluções operacionalmente inviáveis. A empresa também apresenta uma ferramenta para apoiar o controle de tráfego. A proposta de despacho dos veículos é gerada por um algoritmo que segue princípios semelhantes aos propostos pela Empresa γ ; todavia incorpora outros fatores para priorizar o envio do veículo como tempo de queima, ociosidade da frente de colheita, dentre outros, que possuem um peso configurado pelo usuário e servem de base para o envio do veículo.

A Empresa α possui dois módulos relacionados ao planejamento de colheita: macro e semanal. O planejamento de colheita macro possui um horizonte de tempo da safra e está baseado na busca e seleção de blocos de colheita por meio de filtros selecionados pelo usuário. Estes filtros são a idade do canavial, a distância da área, o tipo de variedade, o tempo até o término do PUI, o setor agrícola, dentre outros. As áreas são ordenadas de acordo com o teor de sacarose ou a diferença entre o teor de sacarose e o pico de sacarose da variedade, em ambos os casos os valores são previstos por meio de curvas de maturação. À medida que o usuário seleciona as áreas, o atendimento de restrições vai sendo monitorado, como o raio médio, a idade média do canavial, o cumprimento de meta das frentes e de fornecedores. O planejamento de colheita operacional obedece a premissas semelhantes, mas com um horizonte de tempo semanal. O agrupamento de blocos de colheita leva em conta a fazenda, o tipo de variedade e a idade do canavial. A empresa também apresenta um módulo para apoio à decisão de envio de caminhões às frentes de colheita. Diferente dos dois *softwares* anteriores, propõe que os controladores de tráfego sejam treinados para analisar as variáveis logísticas e apresenta estes indicadores para a tomada de decisão para despacharem o veículo para a área com menor possibilidade de fila e maior probabilidade de manter o suprimento de matéria-prima ininterrupto.

Outras empresas também disponibilizam ferramentas computacionais para a área agrícola canavieira, mas possuem menor proximidade com o tema deste trabalho.

3.1.11 Lacuna na literatura

Na seção 3.1 foi revisada a literatura sobre modelos que tratam do planejamento e controle da produção em usinas de cana-de-açúcar, resumidos na Tabela 3. Várias abordagens de modelagem com distintos métodos de solução foram empregadas para a obtenção de planos de colheita, produção e distribuição física com horizontes de tempo de longo, médio e curto prazo.

Tabela 3: Modelos de planejamento e controle

Tipos de planejamento	Referências	Características
Planejamento industrial	Vijayalakshmi (1987)	Programação linear Contexto governamental
	Paiva e Morabito (2009 e 2013)	Programação inteira mista Maximização de receita Modelo de seleção de processos
	Paiva e Morabito (2011)	Programação inteira mista Maximização de receita Modelo de seleção de processos Otimização robusta
	Carvalho (2009)	Modelo semi-variância de Markowitz Escolha do <i>mix</i> ótimo de produtos
	Mele <i>et al.</i> (2011)	Programação inteira mista Maximização econômica e ecológica de uma rede de usinas Considera o planejamento agrícola, industrial e da distribuição física nesta rede
Distribuição Física	Yoshizaki <i>et al.</i> (1996)	Programação linear Distribuição física do etanol Modelo de fluxo em redes com transbordamento
	Colin <i>et al.</i> (1999)	Programação linear Distribuição física do açúcar Modelo de fluxo em redes
	Kawamura <i>et al.</i> (2006)	Programação linear Distribuição física do açúcar Modelo de fluxo em redes
	Xavier (2008)	Programação inteira mista Localização de tanques de armazenagem de álcool
Desenho da infraestrutura de colheita	Salassi <i>et al.</i> (2002)	Programação inteira mista Definir a quantidade de cana mecanizada e manual Otimização da produtividade e recuperação de açúcares
	Higgins <i>et al.</i> (2004b)	Localização de terminais ferroviários Maximizar teor de açúcares Agregação de áreas em grupos de colheita Capacidade de transporte (raio médio) Meta de processamento da usina
	Higgins e Laredo (2006)	Localização de terminais ferroviários Agregação de áreas em grupos de colheita Capacidade de transporte (raio médio)
	Neungmatcha <i>et al.</i> (2013)	Localizar pontos de carregamento para consolidação de carga de fornecedores Escolha do tipo de carregador

Tabela 3: Modelos de planejamento e controle (continuação)

Tipos de planejamento	Referências	Características
Análise de cenários de colheita e transporte (Simulação discreta)	Arjona <i>et al.</i> (2001)	Testar cenários Amortização de equipamentos
	Higgins e Davies (2005), Higgins e Laredo (2006)	Testar cenários Dimensionamento de recursos (locomotivas e vagões) Turnos de trabalho
	Ianoni e Morabito (2006)	Testar cenários Políticas no descarregamento de caminhões
	Le Gal <i>et al.</i> (2009)	Dimensionamento de recursos de colheita e transporte Baseado em programação de colheita macro
	Silva <i>et al.</i> (2011)	Testar cenários Turnos de trabalho
	Mundim (2009)	Testar cenários Dimensionamento de recursos (caminhões, máquinas e tratores) Políticas de despacho dinâmico de veículos Viabilidade econômica do estoque sobre rodas
	Bastos (2009)	Análise de variáveis relacionadas à logística de colheita e transporte para melhorar regularidade no suprimento de matéria-prima
	Programação e sequenciamento de veículos	Singh e Pathak (1994)
Hahn e Ribeiro (1999)		Minimizar os tempos de fila Considera o número de equipamentos disponíveis nas frentes de colheita, bem como de veículos
Higgins (2006)		Programação inteira mista Minimizar os tempos de fila Considera a disponibilidade de carretas dependente da capacidade de produção da frente de colheita
Formação de blocos de colheita	Higgins <i>et al.</i> (2004b) e Higgins e Laredo (2006)	Minimizar a distância entre a área e o centro de massa do bloco Restrição limitando o tamanho Modelo de programação inteira e função objetivo não linear
	Barata (1992)	Blocos agrupados por variedades, estágio de corte, tipo de solo, distância entre a área e a usina, data do último corte ou plantio, tratamentos culturais, dentre outros
	Jena (2009)	Blocos agrupados por distância entre os talhões menor que um quilômetro, valores da qualidade da matéria-prima iguais, colheita na mesma época e por uma mesma frente
	Planejamento plurianual (implantação e reforma)	Barata (1992)
Higgins <i>et al.</i> (1998)		Maximizar teor de açúcares Meta de processamento Capacidade de transporte (raio médio) Época do ano a ser plantada a variedade (reforma)
Higgins (1999)		Programação inteira mista (GAP)
Higgins e Muchow (2003)		Meta de processamento da usina Maximizar teor de açúcares
Higgins <i>et al.</i> (2004a)		Capacidade de transporte (raio médio) Capacidade de colheita Época do ano a ser plantada a variedade (reforma)
Colin (2009)		Método de implantação do canavial Programação quadrática
Planejamento de plantio	Sartori <i>et al.</i> (2001)	Programação linear Maximizar teor de açúcares Meta de processamento Capacidade de transporte (raio médio)
	Piewthongngam <i>et al.</i> (2009)	Programação linear Maximizar teor de açúcares Época do ano a ser plantada a variedade

Tabela 3: Modelos de planejamento e controle (continuação)

Tipos de planejamento	Referências	Características
Planejamento de colheita macro	Guise e Ryland (1969)	Programação quadrática Considera capacidade industrial, custos de produção e margem de contribuição Análise do momento de início e final de safra para a obtenção de melhor rentabilidade
	Jiao <i>et al.</i> (2005)	Programação quadrática Maximização do teor de sacarose Proporção que cada fazenda deve produzir
	Guilleman <i>et al.</i> (2003), Le Gal <i>et al.</i> (2003), Gaucher <i>et al.</i> (2003), Le Gal <i>et al.</i> (2008), Lejars <i>et al.</i> (2008), Le Gal <i>et al.</i> (2009)	Simulação determinística utilizando o <i>software</i> MAGI Maximizar teor de açúcares Produção agrícola Capacidade industrial Capacidade de transporte e colheita
	Caliari <i>et al.</i> (2004)	Programação linear Frentes de colheita previamente definidas Maximização do teor de sacarose Consideração da capacidade da usina, áreas de maturadores e vinhaça
	Scarpari e Beauclair (2010)	Programação linear Decisão do tipo de colheita (manual e mecanizada) Decisão da tecnologia de transporte (rodotrem ou treminhão) Restrição das capacidades de colheita, carregamento e transporte
	Higgins (2002) e Higgins e Postma (2004)	Programação inteira mista com o problema de escalonamento de enfermeiras Determinação do padrão de entrega de fornecedores à usina Função multiobjetivo Analisa a utilização de terminais ferroviários, locomotivas e sistema viário
	Guan <i>et al.</i> (2009)	Enfoque em uma fazenda Sequenciamento de operações agrícolas Solução através de meta-heurísticas (<i>Simulated Annealing</i> , Algoritmo Genético)
	Stray <i>et al.</i> (2012)	Determinação da sequência de colheita dos fornecedores de uma usina Problema do caixeiro viajante assimétrico com custos dependentes do tempo
	Grunow <i>et al.</i> (2007)	Meta de processamento da usina Maximizar teor de açúcares Capacidade industrial Capacidade de transporte (raio médio) Capacidade de colheita
	Jena e Poggi (2013)	Programação inteira mista GAP Meta de processamento da usina Maximizar teor de açúcares Aplicação de maturadores e vinhaça Capacidade industrial Capacidade de transporte (raio médio) Capacidade de colheita

Tabela 3: Modelos de planejamento e controle (continuação)

Tipos de planejamento	Referências	Características
Planejamento de colheita (Operacional)	Milan <i>et al.</i> (2006)	Minimizar custos de transporte Meta de processamento da usina Capacidade de transporte rodoviário e ferroviário Capacidade de colheita Restrições de jornada de trabalho
	Grunow <i>et al.</i> (2007)	Meta de processamento da usina Maximizar teor de açúcares Dimensionamento de veículos
	Jena e Poggi (2013)	VRP tratado como GAP Meta de processamento da usina Maximizar teor de açúcares Aplicação de maturadores e vinhaça Capacidade de transporte (raio médio) Capacidade de colheita

Analisando estes modelos, percebe-se que, apesar de trabalhos como Higgins (1999), Higgins e Muchow (2003), Higgins *et al.* (2004b), Grunow *et al.* (2007) e Jena e Poggi (2013) abordarem vários dos aspectos do modelo conceitual por meio da modelagem em GAP, o plantio e a colheita são tratados sem a análise dos deslocamentos das frentes de colheita. Parte-se de uma definição prévia das frentes sem considerar a sequência de colheita dos blocos, a perda de capacidade devido ao deslocamento das frentes e sua interferência nas capacidades de colheita e transporte (veja seção 2.4). Stray *et al.* (2012) aborda o sequenciamento das áreas, porém não divide a operação em frentes de colheita, contrastando da realidade brasileira.

Quando estes planos são desdobrados no plano operacional e, posteriormente, no controle de tráfego, pode-se verificar condições de infactibilidade. Contratações momentâneas de terceiros para incrementar a capacidade de colheita e transporte vêm se tornando cada vez mais improváveis, devido à especificidade e alto custo dos recursos de colheita e transporte, como as colhedoras de cana, as unidades de transbordo e as unidades de carga canavieiras (rodotrem).

Com isso, a otimização de açúcares, que foi prevista no planejamento de colheita macro e alimentou o plano industrial, bem como a comercialização dos produtos, não se concretiza ou realiza-se apenas parcialmente. Este tipo de desvio causa desgaste no relacionamento entre os elos da cadeia de produção e prejuízos à empresa, devido à redução de eficiência industrial oriunda da qualidade da matéria-prima inferior à prevista, como também falhas na estratégia de comercialização, especialmente no que tange à venda a mercados futuros.

Desta maneira, percebe-se uma lacuna na literatura gerada pela falta de uma abordagem de otimização que trate a programação das frentes de colheita, visando equilibrar o suprimento à unidade fabril, o manejo varietal, a capacidade de colheita e de transporte, e que possa orientar o tipo de variedade nas áreas a serem plantadas, bem como o dimensionamento de veículos e colhedoras. Estes relacionamentos estão inspirados nas necessidades de usinas localizadas na região Centro-Sul do Brasil, ou seja, unidades produtivas predominando estruturas de colheita e transporte com controle próprio, bem como com tendência à mecanização da colheita e formação de grandes conglomerados.

3.2 O problema de roteamento de veículos (VRP)

Conforme mencionado anteriormente, o VRP pode ser definido como o projeto de rotas otimizadas de coleta ou entrega de um ou mais depósitos a um conjunto de cidades ou clientes dispersos geograficamente, sujeito a restrições adicionais (LAPORTE, 1992). A revisão deste tema é resumida no Apêndice A, pois se trata da primeira tentativa de modelagem do modelo conceitual apresentado na seção 2.6 através do VRPTWSD (Problema de roteamento de veículos com janelas de tempo e entrega fracionada) proposto por Belfiore e Yoshizaki (2009). No entanto, no decorrer da pesquisa, a modelagem por meio do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes se mostrou mais promissora, apesar do desenvolvimento de um modelo matemático por meio de VRP ter potencial para pesquisa futura.

3.3 O problema do dimensionamento e sequenciamento de lotes

Conforme abordado previamente na seção 2.1, o problema do dimensionamento e sequenciamento de lotes (LSP – *Lot sizing and Scheduling Problem*) tem recebido bastante atenção na literatura de planejamento e controle da produção e também de pesquisa operacional. A aplicação de técnicas de pesquisa operacional nesta área tem sido amplamente discutida pela literatura, como reportaram, por exemplo, em Johnson e Montgomery (1974), Hax e Candea (1984), Nahmias (1993), Kuik *et al.* (1994), Drexl e Kimms (1997), Karimi *et al.* (2003), Zhu e Wilhelm (2006), Jans e Degraeve (2007), Jans e Degraeve (2008) e Allahverdi *et al.* (2008).

A seção 3.3.1 mostra resumidamente a evolução do LSP até a modelagem do Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral para Linhas de Produção em Paralelo (GLSPPL – *General Lotsizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines*), proposto por Meyr (2002) e Meyr e Mann (2013), que é apresentado na seção 3.3.1.7 e

base para esta pesquisa. Por fim, a seção 3.3.2 aborda métodos de solução para este tipo de problema.

3.3.1 Evolução do LSP

Esta seção parte do problema do lote econômico, seção 3.3.1.1, um dos problemas mais básicos e estudados nesta área do conhecimento. O problema de Wagner-Whitin, seção 3.3.1.2, insere o conceito de demanda dinâmica no modelo básico. Na seção 3.3.1.3, são analisados problemas com demanda dinâmica e restrições de capacidade do tipo *large bucket*. Já na seção 3.3.1.4, são analisados os problemas com lotes discretos *small bucket*. Na seção 3.3.1.5, o problema do tipo *large bucket* e *small bucket* são agrupados no GLSP. Já na seção 3.3.1.6 é abordada a preparação dependente da sequência. Finalmente, a seção 3.3.1.7 é essencial para a compreensão deste trabalho, pois aborda o conceito de máquinas em paralelo usado no modelo proposto por Meyr (2002) e Meyr e Mann (2013), base para formulação matemática que equaciona o modelo conceitual deste estudo. As seções anteriores à 3.3.1.7 ajudam a compreender a formação do GLSPPL; contudo, para os leitores familiarizados com o tema, sua leitura não é fundamental para o entendimento desta tese.

3.3.1.1 Problema do lote econômico

O problema do lote econômico (EOQ – *Economic Quantity Order*) é o primeiro que trata do *trade-off* entre os custos de formação de estoques e de *setup*, ou seja, o *trade-off* entre estoque e pedido (KUIK *et al.* 1994). Uma das primeiras proposições deste modelo foi feita por Harris (1913) e está voltado a processos com recursos não capacitados e demanda estacionária. Resumidamente, este modelo possui horizonte de tempo contínuo e infinito, taxa de demanda contínua e determinística; não considera custos de falta do produto; assume capacidade ilimitada, estágio e produto únicos, taxa de produção infinita e *setup* independente da sequência produtiva.

Outras variações do EOQ mais genéricas, ainda sendo resolvidas analiticamente, podem ser encontradas em Hax e Candea (1984), Nahmias (1993) e Johnson e Montgomery (1974). Estes últimos autores consideraram custos de falta do produto e taxa finita de produção em suas formulações. Johnson e Montgomery (1974) também apresentaram extensões do EOQ que consideram a redução de custo do pedido devido a descontos concedidos na quantidade, bem como outras extensões para vários itens.

Segundo Kuik *et al.* (1994), o problema do jornaleiro (*News-Boy Problem* ou *News-Vendor Problem*) também pode ser interpretado como uma extensão do EOQ. Neste

problema, além dos custos de falta do produto e excesso de produção ao final de um período, a demanda é considerada estocástica, embora ela continue sendo estacionária (KHOUJA, 1999). O modelo e as extensões resumidamente apresentados nesta seção são classificados por Kuik *et al.* (1994) como processos de demanda estacionária e recursos não capacitados.

3.3.1.2 Problema de Wagner-Whitin (WW)

Neste problema a taxa de demanda e o custo de pedido, considerados no EOQ constantes ao longo do tempo, passam a variar ao longo dos períodos ($t = 1, \dots, T$), embora os valores sejam conhecidos (determinísticos). Ele é considerado por Kuik *et al.* (1994) como não capacitado e com demanda dinâmica. Wagner e Whitin (1958) apresentaram um modelo de programação dinâmica, cujo objetivo é minimizar o custo total, que considera os custos de estocagem e pedido (ou *setup*). O custo de estocagem está baseado no custo calculado sobre o valor unitário do estoque, com base na taxa mínima atrativa de retorno, e o custo de pedido. A variável de decisão é a quantidade pedida (ou produzida) no período, que deve atender à demanda no período.

Wagner e Whitin (1958) propuseram um algoritmo de fácil resolução e provaram que ele produz a solução ótima para a resolução deste problema. Este problema pode ser formulado como um problema do caminho mais curto, podendo ser resolvido com complexidade polinomial (DREXL; KIMMS, 1997). No entanto, apesar de considerar o horizonte de tempo discreto e a demanda dinâmica, o modelo WW ainda trata o problema com taxa de demanda determinística, sem custos de falta do produto, com capacidade ilimitada, estágio e produto únicos e taxa de produção infinita.

Kuik *et al.* (1994) discutiram extensões do modelo WW com múltiplos produtos e sem falta de produtos (WWCC – *Wagner Whitin with Change-Over*), bem como o WW com múltiplos produtos, sem falta de produtos e custos de reposição sendo penalizados na função objetivo (WWJR – *Wagner Whitin with Joint Replenishment Costs*). Também há na literatura o WW com demanda dinâmica e estocástica (WWS – *Wagner Whitin with Stochastic Demands*) e o que analisa linhas de montagem (MLLP – *Multilevel Lotsizing Problem*).

3.3.1.3 Restrições de capacidade com vários produtos

Conforme Drexel e Kimms (1997), outra linha de pesquisa dos EOQ foi a incorporação de restrições de capacidade com vários produtos, para torná-los mais realista. O primeiro esforço de inclusão destas restrições, mas com demanda estacionária, foi feito no

problema de sequenciamento do lote econômico (ELSP – *Economic Lot Scheduling Problem*). Entretanto, diferentemente dos modelos apresentados anteriormente, o ELSP é difícil para se resolver otimamente, predominando a utilização de heurísticas para sua resolução. O problema de dimensionamento de lotes capacitado (CLSP – *Capacitated Lot Size Problem*) é similar ao ELSP; todavia trata da demanda dinâmica, assim como o WW. O CLSP produz em cada período vários itens, sendo assim chamado de *large bucket*. Tipicamente, um período de tempo representa uma semana e o horizonte de tempo seria menos de seis meses (DREXL e KIMMS, 1997).

Drexel e Kimms (1997) formulam o CLSP com os produtos $j = 1, \dots, J$ que devem ser sequenciados em uma máquina dentro do horizonte de tempo finito $t = 1, \dots, T$. Cada produto j possui um estoque inicial (I_{j0}) e uma demanda externa variável ao longo do período t (d_{jt}). Para produzir cada produto j , é consumida a_j unidades de capacidade da máquina, cujo valor total disponível varia de acordo com o período t (K_t). Para preparar a máquina para produzir o produto j há um custo de *setup* (s_j) e seu custo de armazenagem por período é de h_j . Este modelo determina a quantidade produzida e em estoque do item j no final do período t , x_{jt} e I_{jt} respectivamente, bem como a ocorrência de preparação da máquina para produzir o item j no período t , representado pela variável binária z_{jt} , que recebe valor 1, se ocorre a preparação e 0, em caso contrário.

O modelo de programação inteira mista resultante é dado por:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j z_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (6)$$

Sujeito às restrições:

$$I_{jt} = I_{j,t-1} + x_{jt} - d_{jt} \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (7)$$

$$a_j x_{jt} \leq K_t z_{jt} \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j x_{jt} \leq K_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (9)$$

$$z_{jt} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (10)$$

$$I_{jt}, x_{jt} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (11)$$

A função objetivo (6) visa minimizar os custos de *setup* e estoques. As equações (7) fazem o balanço entre produção e demanda, decrescendo ou aumentando nos estoques. As restrições (8) garantem que a produção do item j só pode acontecer se a máquina estiver preparada para ele. As restrições (9) limitam a produção do item j à capacidade de produção disponível no período t . As expressões (10) e (11) definem z_{jt} como variável binária

e I_{jt}, x_{jt} como variáveis não negativas. Maes *et al.* (1991) sugeriram a modificação das restrições (9), incorporando a perda de tempo produtivo com o acréscimo do *setup* do item j , st_j . Neste caso, as restrições ficariam:

$$\sum_{j=1}^J a_j x_{jt} + \sum_{j=1}^J st_j z_{jt} \leq K_t \quad \forall t \quad (12)$$

De acordo com Bitran e Yanasse (1982), o CLSP é um problema NP-Difícil. Incluindo a perda por tempo produtivo, no entanto, Maes *et al.* (1991) demonstra que encontrar uma solução factível já é um problema NP-Completo. Alguns trabalhos propuseram métodos exatos para o problema, tais como Chen e Thizy (1990), no entanto, a maioria dos autores estudaram métodos heurísticos, tais como Cattrysse *et al.* (1990), Diaby *et al.* (1992) e Kirka e Kökten (1994).

3.3.1.4 Lotes discretos

Uma das limitações do CLSP é que ele não considera a sequência de produção dos lotes dentro de um período. Drexel e Kimms (1997) mencionaram que uma abordagem comum não é integrada, resolvendo o CLSP primeiro e, em seguida, um método de sequenciamento da produção em cada período separadamente. Métodos de sequenciamento da produção podem ser encontrados em Johnson e Montgomery (1974), Blazevicz *et al.* (1991) e Allahverdi *et al.* (2008). O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes discretos (DLSP – *Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem*) diferencia do CLSP pelo fato do processo produtivo operar um período completo sem mudar de produtos, ou seja, no máximo um produto pode ser feito por período, o *setup* acontece apenas no início do período e o tamanho do lote é múltiplo de um período de produção completo (FLEISCHMANN, 1990).

Segundo Drexel e Kimms (1997), o período do DLSP pode ser visto como uma subdivisão de um dos períodos do CLSP. Assim, o DLSP envolve microperíodos (*small bucket problem*) e o CLSP, macroperíodos (*large bucket problem*). Por estas características, o DLSP está mais voltado ao curto prazo, com unidade de tempo de dia, turno ou hora. De acordo com Fleischmann (1990), o DLSP é um problema NP-Difícil. Entretanto, a obtenção de uma solução factível pode ser obtida em tempo polinomial (Drexel e Kimms, 1997). Vários autores estudaram técnicas heurísticas para a solução do problema, como Fleischmann (1990), Brüggemann e Jahnke (2000) e Hoesel e Kolen (1994).

Drexel e Kimms (1997) mencionaram outra variação do DLSP que é o problema de dimensionamento de lotes com *setup* contínuo (CSLP – *Continuous Setup Lot-sizing Problem*). Ele é bastante similar ao DLSP, no entanto, permite que as quantidades produzidas no micro período sejam de qualquer tamanho. Além disso, o CSLP permite que haja

interrupção na produção do mesmo produto sem que seja acrescido um *setup*. Outra variação do CSLP proposta por Drexl e Haase (1995) é o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes proporcional (PLSP – *Proportional Lot-sizing and Scheduling Problem*). Neste caso é permitido no máximo um *setup* durante o período. Também é bastante similar ao DLSP, mas permite que até dois itens possam ser produzidos em um período.

3.3.1.5 Dimensionamento e sequenciamento de lotes

Estudos recentes vêm tratando de forma integrada o dimensionamento (*large bucket*) e sequenciamento (*small bucket*) de lotes, caracterizando o problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes (GLSP – *General Lot-sizing and Scheduling Problem*). Fleischmann e Meyr (1997) caracterizaram este tipo de problema como o dimensionamento contínuo de lotes em uma única máquina, sujeito a restrições de capacidade. Cada lote é destinado a um único microperíodo contido em um macroperíodo, definindo, assim, uma sequência de produção e está sujeita a restrições de capacidade nos macroperíodos.

Drexl e Kimms (1997) revisaram a formulação do GLSP em que, diferentemente do CLSP, os produtos j são sequenciados dentro de t em microperíodos $s = 1, \dots, \sum_{t=1}^T |S_t|$, onde S_t representa o conjunto dos microperíodos contidos no macroperíodo t e $S = \sum_{t=1}^T |S_t|$. Este modelo determina a quantidade produzida do item j no final do microperíodo s (x_{js}) e o estoque do item j no final do macroperíodo t (I_{jt}), bem como a ocorrência de preparação da máquina para produzir o item j no microperíodo s , representado pela variável z_{js} , que recebe valor 1 se ocorre a preparação e 0 em caso contrário. Para identificar a mudança de *setup*, outra variável (y_{js}) é igual a 1 se a máquina está preparada para o produto j no microperíodo s e 0 em caso contrário. O parâmetro y_{j0} assume o valor 1 se a máquina está preparada para o produto j no instante inicial, ou seja, no microperíodo 0. O modelo de programação inteira mista resultante é dado por:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S s_j z_{js} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (13)$$

Sujeito às restrições:

$$I_{jt} = I_{jt-1} + \sum_{s \in S_t} x_{js} - d_{jt} \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (14)$$

$$a_j x_{js} \leq K_t y_{js} \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T), s \in S_t \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{s \in S_t} a_j x_{js} \leq K_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{js} \leq 1 \quad (s = 1, \dots, S) \quad (17)$$

$$z_{js} \geq y_{js} - y_{js-1} \quad (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (18)$$

$$y_{js} \in \{0,1\} \quad (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (19)$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (20)$$

$$x_{js}, z_{js} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (21)$$

Assim como nos demais modelos apresentados nesta seção, a função objetivo (13) visa minimizar os custos de *setup* e armazenagem. As equações (14) realizam o balanço entre produção e demanda. Diferentemente do DLSP, este tipo de equação está relacionado ao macroperíodo. As restrições (15) estabelecem que, no caso de haver produção do item j , a máquina está preparada para processá-lo. As restrições (16) estabelecem a restrição de capacidade e as restrições (17) garantem que a máquina está preparada para no máximo um item no microperíodo s . Nota-se que este tipo de restrição existia apenas em problemas do tipo *large bucket*. As restrições (18) definem o microperíodo em que o *setup* deve ser feito. As restrições (19), (20) e (21) definem y_{js} como variável binária e I_{jt}, x_{js}, z_{js} como variáveis não negativas. Como no modelo do DLSP, z_{js} não necessita ser binária uma vez que y_{js} é binário, $y_{js} - y_{js-1}$ e zero serão sempre o limite inferior e a função objetivo induzirá o seu valor a ser o limite inferior. Cabe ressaltar que parte desse modelo vai ser útil para o modelo desta tese.

Araújo *et al.* (2008) propuseram métodos heurísticos como *relax-and-fix* e *simulated annealing* para resolver este problema aplicado à programação e sequenciamento de fornos de pequenas empresas de fundição brasileiras. Toso *et al.* (2009) também resolveram este tipo de problema por meio de heurísticas *relax-and-fix* aplicado à indústrias produtoras de rações animais. Já Clark *et al.* (2010) resolveram alternativamente o problema por meio de algoritmos baseados no problema do caixeiro viajante assimétrico. Vários outros estudos propondo métodos para resolver esse problema podem ser encontrados na literatura, como Toledo e Armentano (2006) e Luche *et al.* (2009).

3.3.1.6 *Setup* dependente da sequência

Em problemas como o CLSP, além de compor a função objetivo, o tempo perdido com o *setup* pode limitar a capacidade dos recursos. Quando o custo (ou tempo) do *setup* não varia (ou a variação é desprezível) em relação ao produto que estava anteriormente sendo produzido, diz-se que há independência na sequência do *setup*; do contrário, há dependência caracterizando o LSPSD (*Lotsizing and Scheduling Problem with Sequence-Dependent setup cost and times*). Tanto problemas com abordagem *small-bucket*

(FLEISHMANN, 1994) quanto *large-bucket* (HAASE; KIMMS, 2000) abordam *setup* dependente da sequência. Segundo Haase e Kimms (2000), o tratamento do *setup* dependente da sequência é relevante no caso de mudança de famílias de produtos e impacta, em especial, em sistemas produtivos com a filosofia *just-in-time*. Rocha *et al.* (2008) destacaram o impacto deste tipo de *setup* quando o objetivo é minimizar o *makespan* ou atender datas de entrega.

Fleishmann e Meyr (1997) apresentaram dois tipos de modelos GLSP com *setup* dependente da sequência: um que conserva a preparação durante períodos ociosos (GLSP-CS – *Conservation of Setup State*) e outro que não conserva (GLSP-LS – *Loss of Setup State*). Neste tipo de problema o custo de *setup* considera a preparação do produto j após a produção do i (s_{ij}). Além disso, a variável binária (z_{ijs}) assume valor 1 se a máquina é preparada para o item j após ter produzido o item i no período s e 0 em caso contrário. Com isso, a função objetivo (13) no GLSP-CS que também visa minimizar os custos de *setup* e armazenagem passa a ser:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S s_{ij} z_{ijs} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (22)$$

As restrições (18) que definem o microperíodo em que a mudança de *setup* deve ser feita, seriam reescritas da seguinte maneira:

$$z_{ijs} \geq y_{js} + y_{is-1} - 1 \quad (i = 1, \dots, J), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (23)$$

Restrições que impõem uma produção mínima (m_j) para evitar que haja a troca de produto sem que haja a produção do mesmo podem ser inseridas neste tipo de problema:

$$x_{js} \geq m_j (y_{js} - y_{js-1}) \quad (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (24)$$

Cabe ressaltar que as restrições de tamanho mínimo de lote possuem especial importância quando a matriz de custos de *setup* não satisfaz a desigualdade triangular:

$$s_{ik} + s_{kj} \geq s_{ij} \quad (i = 1, \dots, J), (j = 1, \dots, J), (k = 1, \dots, J) \quad (25)$$

Vários autores na literatura, como Fleishmann (1994) e Salomon *et al.* (1997), fizeram uma analogia entre o problema de dimensionamento de lotes com *setup* dependente da sequência e o problema do caixeiro viajante. O produto corresponderia à cidade a ser visitada do TSP e o *setup* entre dois produtos corresponderia à distância do trajeto entre cidades. Fleishmann e Meyr (1997) e Meyr (2000) apresentaram abordagens heurísticas baseadas em busca local para a solução deste problema. Já Araújo *et al.* (2007), Toso *et al.* (2009) e Ferreira *et al.* (2010) resolveram este problema por meio de heurísticas do tipo *relax-and-fix* aplicados a fundições, a indústrias de ração e indústria de refrigerantes, respectivamente. Clark *et al.* (2010) também resolveram este problema explorando formulações baseadas no problema do caixeiro viajante assimétrico. Vários outros estudos

propondo métodos para resolver esse problema podem ser encontrados na literatura, como Santos e Almada-Lobo (2012), Toledo *et al.* (2014) e Baldo *et al.* (2014).

3.3.1.7 Máquinas paralelas

Quando são adicionadas máquinas ou linhas de produção paralelas em um problema GLSP-CS, têm-se o Problema Geral de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento para Máquinas em Paralelo (GLSPPL – *General Lot-sizing and Scheduling Problem for Parallel production Lines*). Este modelo é o ponto de partida para o desenvolvimento da modelagem proposta nesta tese.

Neste tipo de problema, Meyr (2002) e Meyr e Mann (2013) adicionaram aos parâmetros e variáveis de decisão o índice $l = 1, \dots, L$, que representa as linhas de produção em paralelo nas quais devem ser sequenciados os lotes dos produtos j . Assim, os produtos j são sequenciados dentro de t em microperíodos $s = 1, \dots, \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T |S_{lt}|$, onde S_{lt} representa o conjunto dos microperíodos contidos no macroperíodo t para a linha l e $S = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T |S_{lt}|$. Este modelo determina a quantidade produzida do item j pela linha l no final do microperíodo s (x_{ljs}) e o estoque do item j no final do macroperíodo t (I_{jt}), bem como a ocorrência de preparação da máquina para produzir o item j depois de ter produzido o item i na linha l e microperíodo s , representado pela variável z_{lij} , que recebe valor 1 se ocorre a preparação e 0 em caso contrário. Para identificar que a linha l está preparada para o produto j no microperíodo s a variável (y_{ljs}) é igual a 1 e 0 em caso contrário. No macroperíodo t , a demanda do produto j é d_{jt} e a capacidade disponível da linha l é dada pelo parâmetro K_{lt} . A capacidade necessária para produzir uma unidade do item j na linha l é dada por a_{lj} , sendo que o tamanho mínimo de lote para a produção do item j na linha l é m_{lj} . O custo de *setup* para a linha l após produzir o produto i e preparar para o item j é dado por s_{lij} e o correspondente tempo de *setup* é dado pelo parâmetro st_{lij} . O parâmetro c_{lj} representa o custo de produção do produto j na linha l e h_j é o custo de estoque do produto j . O parâmetro y_{lj0} assume o valor 1 se a linha l está preparada para o produto j no instante inicial, ou seja, no microperíodo 0 e I_{j0} representa o estoque inicial do produto j . Como base nestas variáveis e parâmetros Meyr (2002), bem como Meyr e Mann (2013) propuseram o modelo de programação inteira mista abaixo:

$$\text{Min } \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S s_{lij} z_{lij} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S c_{lj} x_{ljs} \quad (26)$$

Sujeito às restrições:

$$I_{jt} = I_{jt-1} + \sum_{l=1}^L \sum_{s \in S_{lt}} x_{ljs} - d_{jt} \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (27)$$

$$a_{lj}x_{ljs} \leq K_{lt}y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, L), (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T), s \in S_{lt} \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{s \in S_{lt}} a_{lj}x_{ljs} \leq K_{lt} - \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S st_{lij}z_{lijs} \quad (l = 1, \dots, L), (t = 1, \dots, T) \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{ljs} = 1 \quad (l = 1, \dots, L), (s = 1, \dots, S) \quad (30)$$

$$x_{ljs} \geq m_{lj}(y_{ljs} - y_{ljs-1}) \quad (l = 1, \dots, L), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (31)$$

$$z_{lijs} \geq y_{ljs} + y_{lis-1} - 1 \quad (l = 1, \dots, L), (i = 1, \dots, J), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (32)$$

$$y_{ljs} \in \{0,1\} \quad (l = 1, \dots, L), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (33)$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T) \quad (34)$$

$$x_{ljs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, L), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (35)$$

$$z_{lijs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, L), (i = 1, \dots, J), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (36)$$

A função objetivo (26) visa minimizar os custos de produção, *setup* e armazenagem. As equações (27) realizam o balanço de entre produção e demanda. As restrições (28) estabelecem no caso de haver produção do item j , a linha l está preparada para processá-lo. As inequações (29) estabelecem a restrição de capacidade, sendo que neste caso é considerado o tempo perdido com *setup*. As equações (30) garantem que a máquina l está preparada para produzir no máximo um produto j no microperíodo s . As restrições (31) impõem uma produção mínima para evitar que haja a troca de produto sem que haja a produção zero dos mesmos. As restrições (32) definem o microperíodo em que o *setup* deve ser feito. Quanto às restrições (32), elas podem ser substituídas por restrições equivalentes como:

$$y_{lis-1} = \sum_{j=1}^B z_{lijs} \quad (l = 1, \dots, L), (i = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^B z_{lijs} = y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, L), (j = 1, \dots, J), (s = 1, \dots, S) \quad (38)$$

Segundo Wolsey (1998) e Ferreira *et al.* (2012) estas restrições reduzem a magnitude do problema reduzindo a quantidade de restrições caso haja mais que dois produtos j . Fleischmann e Meyr (1997) propuseram restrições redundantes, mas que forçam microperíodos ociosos estarem no final do macroperíodo como as seguintes, para eliminar simetrias (soluções equivalentes) no problema:

$$y_{ljs-1} \geq y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, L), (j = 1, \dots, J), (t = 1, \dots, T), \forall s \in (S_t - S_{0t}) \quad (39)$$

Sendo que S_{0t} representa o conjunto dos primeiros microperíodos de cada macroperíodo. As expressões (33), (34), (35) e (36) definem y_{ljs} como variável binária e $I_{jt}, x_{ljs}, z_{lijs}$ como variáveis não negativas.

Meyr (2002) resolveu este problema por meio de métodos heurísticos de busca local. Meyr e Mann (2013) resolveram este modelo por meio de um método de decomposição em subproblemas. Beraldi *et al.* (2008) resolveram-no utilizando heurísticas do tipo *relax-and-fix*. Ferreira *et al.* (2012) resolveram o problema com reformulações baseadas no problema do caixeiro viajante assimétrico, utilizando rotinas de eliminação de sub-rotas e heurísticas *patching*.

3.3.2 Métodos de solução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes

De modo geral, este tipo de problema é caracterizado como um problema de programação inteira mista. Pochet e Wolsey (2006) definiram este tipo de modelo, que envolve variáveis contínuas e inteiras, bem como restrições lineares, representado da seguinte maneira:

$$Z(X) = \min_{(x,y)} \{cx + fy : (x, y) \in X\} \quad (40)$$

onde o conjunto X é o conjunto das soluções factíveis e pode ser representado por:

$$X = \{(x, y) \in \mathbb{R}_+^n \times \mathbb{Z}_+^p : Ax + By \geq b\} \quad (41)$$

Assim como no caso do VRP e conforme foi exemplificado na seção 3.3.1, a utilização de métodos exatos para resolver o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes é custosa computacionalmente. Algumas heurísticas utilizadas comumente na literatura também são brevemente discutidas a seguir.

3.3.2.1 Métodos exatos

Os métodos exatos mais utilizados para a resolução de problemas de programação inteira mista, bem como para servir de base para heurísticas que apresentam bom desempenho para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, são o *Branch-and-Bound* e o *Branch-and-Cut*. O algoritmo *Branch-and-Bound* é amplamente conhecido na literatura e utiliza uma estratégia de “dividir para conquistar” para resolver problemas de programação inteira mista (POCHET; WOLSEY, 2006). Trata-se de um método de enumeração implícita que subdivide as possíveis soluções de um problema de programação inteira mista em subconjuntos considerados e descartados por não possuírem a solução ótima ou terem o mesmo valor dela. Para isso, o método utiliza programação linear para encontrar limitantes (ARENALES *et al.*, 2007).

Outro tipo de técnica empregada em modelos de programação inteira mista são os planos de corte, que restringem a região factível por meio de desigualdades válidas

(POCHET; WOLSEY, 2006). O procedimento de Chvátal-Gomory permite encontrar desigualdades válidas em problemas de programação inteira mista. Combinando os algoritmos *branch-and-bound* e de plano de cortes, obtém-se o algoritmo *branch and cut*. Assim, são adicionadas desigualdades válidas, por exemplo, Cortes de Gomory, em cada nó da árvore *branch-and-bound*, de forma a obter um limitante superior mais apertado (ARENALES *et al.*, 2007). Pochet e Wolsey (2006) e Arenales *et al.* (2007) apresentaram revisões destes métodos. A base destes algoritmos está na programação linear e no método *branch and bound*, no entanto, tornam-se complexos ao integrar componentes sofisticados, como estratégias avançadas de busca, pré-processamento e técnicas de sondagem, algoritmos de planos de corte e heurísticas primais. Estes componentes, bem como a alteração dos parâmetros *default*, podem melhorar significativamente o desempenho do método *branch and bound* puro. Exemplos de sistemas comerciais que incorporam os algoritmos mencionados anteriormente são: CPLEX, GUROBI, LINDO e Xpress-MP (ATAMTÜRK; SAVELSBERGH, 2005).

Estes sistemas computacionais, *solvers*, também estão integrados a pacotes computacionais (linguagem de modelagem algébrica) voltados à resolução de problemas de otimização, como o GAMS (ROSENTHAL, 2008). Além de integrar *solvers*, estes pacotes possibilitam a preparação e transformação dos dados do problema, a elaboração de relatórios, bem como de arquivos com os dados de saída (ROSENTHAL, 2008). Nesta tese será utilizado o *solver* CPLEX integrado ao GAMS para a resolução dos modelos de programação inteira mista. Para problemas de grande porte em que a árvore *branch-and-bound* é truncada devido ao alto tempo para encontrar a solução ótima, uma medida da qualidade da solução encontrada é dada pelo *Gap* de otimalidade, ou dualidade, calculado da seguinte maneira:

$$\text{Gap de otimalidade} = \frac{\text{MelhorLS} - \text{MelhorLI}}{\text{MelhorLS}} * 100[\%] \quad (42)$$

em que o *MelhorLI* representa o melhor limitante inferior, ou seja, o melhor valor para a solução inteira encontrada por meio do método *Branch-and-Bound*, e o *MelhorLS* representa o melhor valor encontrado para a função objetivo (POCHET; WOLSEY, 2006).

3.3.2.2 Métodos Heurísticos

Dada a dificuldade em resolver problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes por meio de métodos exatos (BITRAN; YANASSE, 1982), métodos heurísticos vêm sendo aplicados em problemas reais de grande porte com bastante sucesso na literatura. Várias definições de heurísticas podem ser encontradas na literatura (SILVER *et al.*, 1980). De acordo com Silver (2004), uma heurística é um método que, com base na

experiência ou julgamento, procura gerar uma solução razoável para um problema, mas que não garante uma solução matematicamente ótima. Vários trabalhos propõem uma tipologia para heurísticas, como Ball e Magazine (1981), Zanakis *et al.* (1989) e Silver (2004). Este último autor dividiu os métodos heurísticos nos seguintes tipos:

- i. Heurísticas envolvendo soluções geradas aleatoriamente: este tipo de método consiste em gerar aleatoriamente soluções factíveis, avaliá-las e escolher a melhor.
- ii. Heurísticas de decomposição ou partição do problema: o modelo original é subdividido em partes menores tratáveis. Com os subproblemas definidos, três abordagens podem ser adotadas: resolvê-los independentemente e gerando uma solução factível; resolvê-los sequencialmente, utilizando os resultados de um como dado de entrada do outro; e resolvê-los interativamente, todavia não da maneira sequencial. Ao final das iterações tem-se uma solução factível completa.
- iii. Heurísticas envolvendo métodos indutivos: tratam da generalização de versões mais simples ou menores de um problema; ou um problema matematicamente relacionado. Assim, a solução do problema é construída por meio de analogias.
- iv. Heurísticas que restringem o espaço de solução: trata-se de restringir o conjunto de soluções de um problema de tal forma que ele possa ser resolvido mais facilmente.
- v. Heurísticas de aproximação: envolvem, de alguma forma, a manipulação de um modelo matemático. Elas podem ser divididas em quatro formas: agregação de parâmetros, modificação ou aproximação da função objetivo, aproximação de distribuições de probabilidade ou processos estocásticos e alterando a natureza das restrições, incluindo métodos de relaxação.
- vi. Heurísticas construtivas: geram uma solução adicionando componentes individuais (por exemplo, arcos e nós) até que uma solução factível seja obtida.
- vii. Heurísticas de melhoria local (busca em vizinhança): partem de uma solução inicial factível e realizam melhorias sucessivas por meio de uma sequência de trocas e junções em buscas locais.

Estes tipos de métodos não são mutuamente excludentes, pelo contrário, é comum e recomendável a combinação de mais de um destes tipos de heurísticas (SILVER, 2004). Como mostra a seção 4.2, os métodos de solução propostos nesta tese terão características dos tipos (ii), (iii), (iv), (v) e (vi).

Conforme mencionado na seção 3.3.2.1, sistemas comerciais vêm desenvolvendo *solvers* com componentes bastante elaborados para resolver problemas de programação inteira mista reais de grande porte e difícil solução. Por exemplo, Fishetti *et al.* (2009) propuseram a utilização das tecnologias já desenvolvidas nos *solvers* em métodos heurísticos. Além disso, pacotes computacionais, como o GAMS, permitem que haja controle de fluxo do algoritmo. Dentro desta visão, heurísticas mistas como *Local Branching* (LB) e *Relaxation Induced Neighborhood Search* (RINS) se destacam como métodos de melhoria presentes em *solvers* disponíveis no mercado (POCHET; WOLSEY, 2006; FISHETTI *et al.*, 2009). Outros métodos como o *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* se destacam na resolução de problemas reais de grande porte (POCHET; WOLSEY, 2006; FISHETTI *et al.*, 2009; SAHLING *et al.*, 2009; HELBER; SAHLING, 2010; LANG; SHEN, 2011; SEEANNER *et al.*, 2013).

3.3.2.2.1 Heurísticas presentes em *solvers* comerciais

Para a resolução do modelo de programação matemática proposto nesta tese, serão usadas as heurísticas, *Local Branching* (LB), *Relaxation Induced Neighborhood Search* (RINS) e *Feasibility Pump* (FP), para analisar seu impacto na velocidade de execução e qualidade da solução do *solver* CPLEX 12.

Seja $Q = \{1, \dots, p\}$ o conjunto dos índices das variáveis y . Sendo assim, de acordo com Pochet e Wolsey (2006), na heurística *Local Branching* a vizinhança é construída utilizando soluções inteiras. Um inteiro k é escolhido e a vizinhança consiste nos vetores y que não diferem de \bar{y} em mais de k coordenadas. O algoritmo é resolvido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \{cx + fy: Ax + By \geq b \\ x \in \mathbb{R}_+^n, y \in \{0,1\}^p \\ \sum_{j \in Q: \bar{y}_j=0} y_j + \sum_{j \in Q: \bar{y}_j=1} (1 - y_j) \leq k\} \end{aligned} \quad (43)$$

Mais detalhes sobre este algoritmo podem ser encontrados em Danna *et al.* (2005), Pochet e Wolsey (2006) e Fishetti *et al.* (2009). O pacote CPLEX 12 traz esta heurística desligada por padrão, mas, quando acionada, ela é chamada apenas quando novas soluções são encontradas.

Outra heurística com características semelhantes à LB é a FP, que utiliza o mesmo subproblema de LB, mas relaxando as variáveis inteiras para lineares e as diferenças são tratadas na função objetivo. Mais detalhes desta heurística podem ser vistos em Fishetti *et al.* (2005) e Fishetti *et al.* (2009). O pacote CPLEX 12 traz esta heurística ligada por padrão,

podendo configurar dois tipos de ênfase priorizar soluções factíveis ou de boa qualidade. No padrão esta escolha é feita automaticamente pelo pacote, mas pode ser desligada se for pertinente.

De acordo com Pochet e Wolsey (2006), a ideia da heurística RINS é explorar a vizinhança entre a solução linear (\hat{x}, \hat{y}) e a inteira (\bar{x}, \bar{y}) . Se uma variável y_i possuir o mesmo valor nas duas soluções, esta variável é fixada com o valor coincidente encontrado, como a seguir:

$$\begin{aligned} \min \{cx + fy: Ax + By \geq b \\ x \in \mathbb{R}_+^n, y \in \{0,1\}^p \\ y_i = \bar{y}_j \forall j \in Q \text{ com } \bar{y}_j = \hat{y}_j\} \end{aligned} \quad (44)$$

Mais detalhes desta heurística são apresentados por Pochet e Wolsey (2006) e Danna *et al.* (2005). Esta heurística é chamada e usada pelo pacote CPLEX 12 para a melhoria de soluções atuais. Na configuração padrão, a quantidade de vezes que esta heurística é acionada é automática, mas ela por ser desabilitada ou chamada a cada n nós da árvore, onde n é predefinido pelo usuário.

Dadas as possíveis limitações das heurísticas incorporadas ao CPLEX 12 na busca de soluções viáveis para problemas combinatoriais de grande porte, que são esperados na aplicação a problemas em escala real, duas heurísticas complementares não contidas no pacote CPLEX 12 são apresentadas nessa revisão bibliográfica nas próximas seções.

3.3.2.2 *Relax-and-fix*

Esta heurística pode ser caracterizada como construtiva e envolve programação matemática, bem como as lógicas de relaxação e decomposição. Para um modelo de programação matemática inteira mista (MIP - expressões (40) e (41)), as variáveis de decisão inteiras são representadas por y e as reais por x . Nesta heurística y é particionada em R conjuntos distintos Q^1, \dots, Q^R de importância decrescente. Estes conjuntos também são unidos em subconjuntos U^r , com $U^r \subseteq \bigcup_{u=r+1}^R Q^u$ para $r = 1, \dots, R - 1$. São resolvidos R MIPs, ou seja, MIP^r com $1 \leq r \leq R$, para se encontrar a solução do MIP original (POCHET; WOLSEY, 2006).

Assim, MIP^1 é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Min}\{cx + fy: Ax + By \geq b; \\ x \in \mathbb{R}_+^n; \\ y_j \in \{0,1\} \forall j \in Q^1 \cup U^1; \\ y_j \in [0,1] \forall j \in Q \setminus (Q^1 \cup U^1)\} \end{aligned} \quad (45)$$

Os demais MIP^r , com $2 \leq r \leq R$, utilizam a solução inteira de MIP^1 como dado de entrada e são representados por:

$$\begin{aligned} \text{Min}\{cx + fy: Ax + By \geq b; \\ x \in \mathbb{R}_+^n; \\ y_j = y_j^{r-1} \in \{0,1\} \forall j \in Q^1 \cup \dots \cup Q^{r-1}; \\ y_j \in \{0,1\} \forall j \in Q^r \cup U^r; \\ y_j \in [0,1] \forall j \in Q \setminus (Q^1 \cup \dots \cup Q^r \cup U^1)\} \end{aligned} \quad (46)$$

Conforme podemos perceber em (64) e (65), este método separa um conjunto y e resolve como variáveis inteiras; as demais são resolvidas como variáveis contínuas. Os valores obtidos para as variáveis y , *que foram* tratadas como inteiras das iterações anteriores, são utilizadas como dados de entrada (valores inteiros fixos) para as iterações subsequentes. Ao final das iterações, y possui apenas variáveis inteiras, todavia, cada iteração resolve problemas mais tratáveis que o original.

Por exemplo, Escudero e Salmeron (2005) estudaram a aplicação desta heurística com várias estratégias de particionamento para um problema de sequenciamento de projetos. As estratégias estudadas foram as partições do problema (Q^1, \dots, Q^R) com base nos seguintes parâmetros: período, valor do projeto para a função objetivo, custo relativo do projeto, relação entre o valor e gasto do orçamento do projeto e partição aleatória. De acordo com seus experimentos, as partições baseadas no valor do projeto para a função objetivo, no custo relativo do projeto e na relação entre o valor e gasto do orçamento do projeto, obtiveram tempos computacionais menores que as demais instâncias. Para problemas com 105.112 nós, obtiveram um tempo computacional de 28 horas e um *Gap* de otimização (vide seção 3.3.2.1) menor que 0,1%. Para problemas maiores com 200.864 nós, levou-se aproximadamente seis dias para a resolução, mas não foram obtidos *Gaps* de otimização viáveis com todas as estratégias que foram. O melhor deles foi da ordem de 0,002%.

Beraldi *et al.* (2008) utilizaram o *relax-and-fix* juntamente com uma heurística de horizonte rolante em um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com máquinas paralelas e *setup* dependente da sequência. Neste caso, as estratégias de partição adotadas foram: baseadas no produto, no tempo, híbrida do produto e depois tempo e, finalmente híbrida do tempo e depois produto. Para a resolução, os autores utilizaram CPLEX com C++ para problemas de aproximadamente 1.000 nós e obtiveram *Gaps* de otimização inferiores a 3%, bem como tempos computacionais da ordem de 30 minutos.

Ferreira *et al.* (2009 e 2010) aplicaram a *relax-and-fix* para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com tempo e custo de *setup* dependentes da sequência para uma indústria de refrigerantes de pequeno porte. Os autores propuseram cinco estratégias de partição das variáveis inteiras por tempo combinadas com a fixação de algumas variáveis. Exemplos desta fixação de valores seriam: assegurar que determinada máquina e/ou tanque estejam preparados, determinar que haveria determinada troca de produto, e/ou impor que o tamanho de um lote seja fixo. Além disso, outras estratégias foram testadas fixando valores de variáveis apenas se há produção para elas, bem como considerando variáveis de períodos anteriores. Modificações em parâmetros do CPLEX também foram testadas, como desligar o plano de cortes, o pré-processamento, ligar heurísticas de arredondamento, *LB* e *RINS*. As soluções apresentaram resultados que melhoraram a solução existente na empresa.

Toso *et al.* (2009) estudaram a aplicação de *relax-and-fix* no problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com uma máquina e tempo e custo de *setup* dependentes da sequência em uma planta produtora de componentes para ração animal. Os resultados também foram comparados com o problema com *setups* independentes. As partições das variáveis inteiras foram tratadas em três estratégias: (i) O número de lotes era relaxado e as variáveis associadas ao *setup* eram fixas. Depois as variáveis de *setup* eram fixas e o número de lotes tratado como inteiro. (ii) Partição temporal crescente, período a período (*forward*). (iii) Partição temporal decrescente, período a período (*backward*). A estratégia *relax-and-fix* mais promissora avaliada pelos autores foi a (i), embora o problema com dependência de *setup* tenha se mostrado ainda de difícil resolução para ser adotado pela empresa.

3.3.2.2.3 *Fix-and-optimize*

Helber e Sahling (2008) propuseram esta heurística de melhoria para uma solução factível do problema de dimensionamento de lotes dinâmico, capacitado e multi-estágio. Trata-se também de uma heurística baseada em programação matemática. Em cada iteração, ela fixa a maioria das variáveis de *setup*, reduzindo o número de variáveis livres, tornando, assim, o problema mais tratável. Diferente de *relax-and-fix*, que é uma heurística construtiva e particiona as variáveis em fixas, inteiras e reais, neste método ocorre apenas as duas primeiras partições e admite-se que se conhece uma solução factível inicial para o problema. Estes autores propuseram três tipos básicos de estratégias de particionamento: (i) Orientada pelo produto: cada subproblema corresponde a um único produto. (ii) Orientada pelo recurso: cada subproblema corresponde a um recurso e um conjunto de períodos. (iii)

Orientada pelo processo: cada subproblema corresponde a um conjunto de períodos e à relação predecessor-sucessor.

Os autores propuseram combinações destas estratégias: (i) (pura), (i)+(ii), (i)+(iii), e (i)+(ii)+(iii). Eles encontraram bons resultados para esta classe de problema ressaltando a facilidade de implementação, qualidade da solução e flexibilidade. Sahling *et al.* (2009) também encontraram bons resultados quando abordaram o mesmo problema com conservação de *setup* e mantiveram as mesmas estratégias *fix-and-optimize*. Lang e Shen (2011) trataram o problema de dimensionamento de lotes capacitado dinâmico com dependência de custos e tempos de *setup*, incluindo substituição de produtos, com a heurística *fix-and-optimize* melhorando uma solução inicial trivial. Os autores utilizaram uma estratégia de decomposição temporal e compararam com métodos exatos e *relax-and-fix*. Seus resultados mostraram valores 5% piores que os métodos exatos, mas 19% melhores que o *relax-and-fix*.

3.4 Validação dos modelos

Conforme discutido no capítulo 2, o modelo proposto neste trabalho deve minimizar o deslocamento das frentes de colheita, garantindo o cumprimento das metas de suprimento, equalizando as capacidades de colheita e transporte, atendendo às janelas de tempo, bem como às premissas de setorização das frentes, quando necessárias. Os dados de saída deste modelo, além de apoiarem as decisões de deslocamento das frentes de colheita, orientam o tipo de variedade (precoce, média ou tardia) a ser plantada, futuramente, bem como validam o dimensionamento de colhedoras e caminhões propostos para a safra.

A seção 3.1.10 deste capítulo mostra que embora haja diversos estudos relacionados na literatura, eles não abordam diretamente a programação e o sequenciamento das frentes de colheita, visando equilibrar o suprimento à unidade fabril, o manejo varietal, a capacidade de colheita e de transporte, que possa orientar o tipo de variedade nas áreas a serem plantadas, bem como o dimensionamento de veículos e colhedoras.

As seções 3.2 e 3.3 exploraram duas analogias com problemas existentes na literatura que poderiam retratar o modelo conceitual proposto: o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo e entregas fracionadas, bem como o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com *setup* dependente e máquinas em paralelo, respectivamente. A seção 4.1 justifica com maior detalhe a escolha feita nesta tese por uma abordagem inspirada na segunda analogia.

A seção 3.3.2 também apresentou métodos de solução de problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes de grande porte bem sucedidos na literatura, como, por exemplo, os métodos baseados em programação matemática do tipo *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. A seção 4.2 detalha a escolha por resolver o modelo proposto com estes métodos.

Esta seção faz uma breve revisão de trabalhos voltados à validação de modelos matemáticos em ambientes reais de operação. Vasco (2012) e Vasco e Morabito (2014) propuseram um modelo para a otimização na alocação dinâmica de veículos no transporte rodoviário de cargas completas entre terminais, como também estudaram e aplicaram abordagens de validação no desempenho deste modelo, baseados na metodologia de Oral e Kettani (1993) apresentada adiante. Outras abordagens também são discutidas em Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito e Pureza (2010) para pesquisa quantitativa e empírica baseadas em modelos matemáticos.

A seção 1.2 também mostrou por meio da Figura 2 que a validação faz parte do processo de resolução de uma situação problema (MITROFF *et al.*, 1974; LANDRY *et al.*,

1983; BERTRAND; FRANSOO, 2002; ARENALES *et al.*, 2007; MORABITO; PUREZA, 2010). Segundo Finlay e Wilson (1991), o processo de validação, que é bem definido em muitos ramos da ciência, não é tão claro na área da administração, em especial, na validação de sistemas de apoio à tomada de decisão (DSS – *Decision Support Systems*). Estes autores definiram a validação como o processo de verificação de um modelo para ajudar a resolver problemas do mundo real, do ponto de vista dos envolvidos na criação e no uso do modelo.

Tilanus (1985) analisou na literatura 60 aplicações de métodos quantitativos em DSS no governo, na agricultura, na indústria e em empresas de serviço na Holanda. A partir desta análise foram levantadas razões para o fracasso e o sucesso destas aplicações. Dentre as razões de fracasso se destacaram a incompatibilidade entre o modelo e o problema, a falta de envolvimento e entendimento do usuário, a complexidade do modelo e o alto tempo computacional, mudanças no ambiente organizacional da empresa, bem como deficiência ou incerteza dos dados coletados. Quanto às razões de sucesso, alguns exemplos são: uma boa cooperação do usuário, o potencial de ganho econômico e a melhoria da tomada de decisão, a simplicidade, clareza e flexibilidade do modelo, bem como a qualidade e sensatez da solução.

Segundo Borenstein (1998), a validação não deve se preocupar com a reprodução exata da realidade, mas com a demonstração de que o DSS representa razoavelmente bem as relações entre o modelo e a realidade. A validação é necessária para conhecer o que um sistema sabe, o que ele sabe errado e o que ele não sabe. O estudo de métodos de validação de DSS é importante como forma de estruturar o processo de validação. O autor menciona que muitos trabalhos sobre métodos de validação na literatura são demasiadamente descritivos ou se prestam apenas à avaliação do sistema, que está ligada à relação de um *software* com o problema real. Como mencionado anteriormente nesta seção, o processo de validação é muito mais amplo; além disso, questões práticas do processo, como as restrições de custo e tempo, em geral são negligenciadas.

Landry e Oral (1993), apresentando uma edição especial do *European Journal of Operational Research* (volume 66 de 1993), mencionaram que o tema da validação de modelos aparece apenas periodicamente na literatura de pesquisa operacional até os anos 1990. Muito se deve à dificuldade de definir o que seria um modelo validado, que pode variar ao longo do tempo, conforme a evolução da área temática. Vários estudos anteriores trataram da validação de modelos com a perspectiva da eficiência (fazendo certo a coisa), negligenciando ou ignorando a perspectiva da eficácia (fazendo a coisa certa). Nesta segunda perspectiva, é necessário atentar que a generalização de métodos de validação é difícil de ser estendida a todas as classes de modelos, sendo muitas vezes aplicada a casos específicos.

Déry *et al.* (1993) se aprofundaram na epistemologia da validação de modelos de pesquisa operacional e reforçaram que não há um modelo universal ou um critério formal de validação que possam garantir o caráter científico de um modelo de pesquisa operacional, pois este processo envolve também relações sociais. De acordo com os autores, o pesquisador da área deve considerar para a formulação de métodos de validação, além dos critérios cognitivos, o impacto das organizações sociais que o influenciam. Nesta pesquisa, estas organizações sociais seriam a instituição de ensino, a empresa de consultoria em que o pesquisador atua e as empresas em que o modelo poderia ser aplicado.

Miser (1993) abordou os fundamentos do conceito dos métodos científicos adequados para a validação em pesquisa operacional. Assim como Déry *et al.* (1993), ele fez um paralelo entre a validação de modelos e a validação de teorias, concluindo não só que não há qualquer critério universal para a validação, mas que qualquer critério de validade é relativo pelo menos em dois pontos: o fenômeno que está sendo modelado e o uso que está sendo feito do modelo. Entretanto, apesar da subjetividade inerente ao tema, vários trabalhos da literatura propuseram métodos de validação de modelos de pesquisa operacional, que proporcionaram importante conhecimento para a estruturação deste processo, como em Gass (1987), Labys (1990), Finlay e Wilson (1991), Williams e Silkora (1992), Davis (1992), Smith (1993), Gass (1993), Oral e Kettani (1993), Borenstein (1998) e Bertrand e Fransoo (2002), por exemplo.

Um conceito apresentado nesta literatura é o da acreditação (*accreditation*), que seria uma determinação oficial que o modelo é aceitável para um propósito específico. Assim, conforme o processo de validação vai seguindo suas etapas, a credibilidade do modelo vai aumentando (WILLIAMS; SILKORA, 1992; SEGLE; SANDERS, 1992; GASS, 1993). Para Gass (1993), a acreditação do modelo é dada por uma ponderação da avaliação de cada passo da validação. Para quantificar o valor da acreditação, o autor utilizou o processo hierárquico analítico proposto (AHP – *Analytic Hierarchy Process*). Williams e Silkora (1992), Davis (1992) e Gass (1993) propuseram etapas para a validação: verificação lógica (METZGER, 1992), documentação (CYNAMON, 1992), verificação do código do programa (METZGER, 1992), validação de face (GAVER, 1992), revisão independente (CYNAMON, 1992), validação dos dados, comparação com dados de laboratório e comparação com dados operacionais (GIADROSICH, 1992). Especial esclarecimento cabe à validação de face que consiste na avaliação da solução por um especialista da área (GAVER, 1992) e à revisão independente que deve ser feita por revisores objetivos e competentes, independentes do processo de desenvolvimento do modelo (CYNAMON, 1992).

Oral e Kettani (1993) derivaram o modelo proposto na Figura 2 para um tetraedro representado na Figura 10. O tetraedro é útil para classificar os tipos de problemas de pesquisa operacional, relacionando-os a uma de suas facetas. Esta abordagem é utilizada para a validação do modelo proposto no capítulo 6.

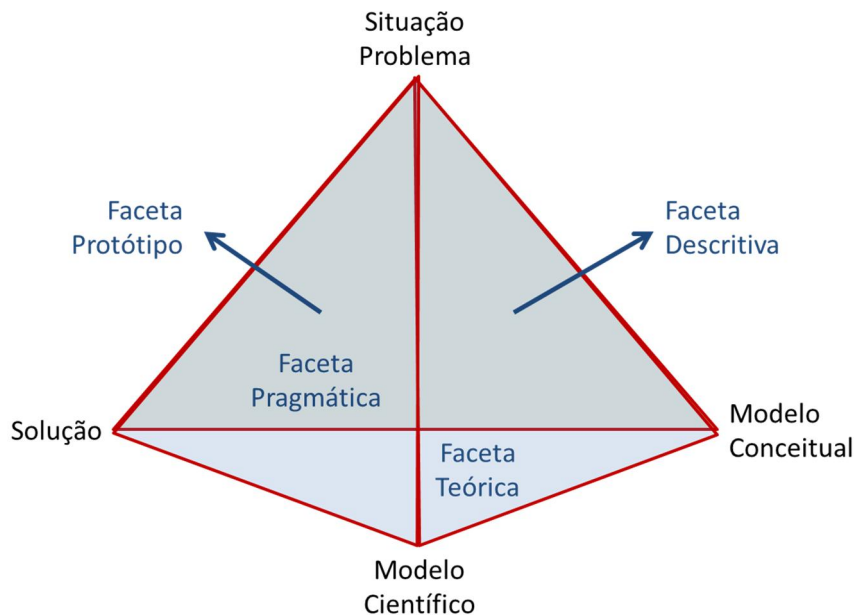


Figura 10: Tetraedro para a validação de modelos

Fonte: Adaptado de Oral e Kettani (1993)

Na faceta do protótipo, que envolve situação problema, modelo científico e solução, o modelo conceitual não é relevante, pois a pesquisa deve estar baseada em tipos de problemas bem concebidos na literatura, como aplicações puras dos problemas de designação, caixeiro viajante, roteamento de veículos, dimensionamento e sequenciamento de lotes, entre outros. Neste tipo de pesquisa, quatro formas de validação devem ser levadas em consideração: da formulação, experimental, operacional e de dados. A validação da formulação preocupa-se com o nível de relevância com que as premissas e teorias que fundamentam o modelo teórico se adequam à situação problema. A validação experimental está associada com a qualidade da solução (nível de entendimento da situação problema da solução, sensibilidade ao mudar parâmetros, aceitabilidade, aplicabilidade e utilidade na tomada de decisão), os tipos de solução (implícita ou explícita, ótima ou satisfatória), a natureza da solução (exata, heurística ou procedimento de tentativa e erro) e a eficiência dos procedimentos de solução (tempo, esforço e custos). A validação operacional está relacionada com a facilidade de uso, utilidade, tempo de resolução, sinergismo e custo de implementação

de tomadas de decisões baseadas em soluções geradas por um modelo científico, considerando o ponto de vista dos usuários e da situação gerencial. A validação dos dados se preocupa com a adequação, exatidão, conveniência, viabilidade, manutenção, confiança e custos dos dados.

Outra faceta é a descritiva, que envolve situação problema, modelo conceitual e modelo científico, em que a solução, ou seja, a tomada de decisão, não é a principal preocupação. Esta faceta será utilizada para a validação do modelo proposto nesta tese. A ênfase de problemas inseridos nesta faceta é a de compreender o sistema ou a organização em que a situação problema está inserida. Neste tipo de pesquisa, quatro tipos de validação devem ser levados em consideração: conceitual, lógica, de aptidão e de dados. A validação conceitual se preocupa com a adequação do método de obtenção e uso da percepção dos atores sobre o modelo conceitual. A validação lógica está relacionada com a veracidade do processo de modelagem formal, ou seja, de transformação do modelo conceitual em um científico. A validação de aptidão está relacionada com a representatividade, facilidade de uso, utilidade, sinergismo e o custo do uso de um modelo formal. Este tipo de validação é muito próximo da operacional, todavia se diferencia dela, especialmente em problemas complexos. Como não é claro identificar os beneficiários do sistema de apoio à tomada de decisões, o modelo é desenvolvido com base nas premissas dos tomadores de decisão ou formuladores de políticas. Em muitos casos, representantes dos usuários mais isentos, chamados assessores, podem apresentar suas opiniões para o desenvolvimento do modelo. Assim, a interação entre as visões dos usuários, formuladores de políticas e assessores forma uma nova dimensão neste tipo de validação.

A terceira faceta é a pragmática, que envolve situação problema, modelo conceitual e solução, em que a preocupação com o modelo científico não é prioritária. As abordagens de modelagem pertencentes a esta faceta são pressionadas pelo ambiente em que a situação problema está inserida a obter uma solução, de tal forma que a construção de um modelo científico não é viável. Assim, as ações acabam sendo fundamentadas em modelos mentais ou informais. Neste tipo de pesquisa, quatro tipos de validação devem ser levados em consideração: conceitual, de legitimidade, operacional e de dados. A validação de legitimidade substitui a lógica e a experimental, em situações nas quais não há um modelo científico. Neste caso, é necessário demonstrar de alguma maneira que as premissas para a tomada de decisão estejam em conformidade com o modelo conceitual.

A última faceta, a teórica, que envolve modelo conceitual, modelo científico e solução, está relacionada com problemas de pesquisa operacional em que a situação problema

já está bem representada em um modelo conceitual. Os problemas classificados nesta faceta estão voltados à formação de conceitos abstratos e generalizações. Cabe ressaltar que a proposição de métodos de solução de problema se enquadra nesta faceta. Neste tipo de pesquisa, quatro tipos de validação devem ser levados em consideração: lógica, experimental, de verificação e de dados. A validação de verificação possui dois aspectos: de justificativa e de verificação da necessidade de resolução do modelo científico. O primeiro aspecto corresponde às validações conceitual e operacional quando não há um modelo conceitual. Neste caso, deve haver, de alguma forma, a verificação de que o modelo científico e as soluções obtidas estão em conformidade com a situação problema. Já o outro aspecto está relacionado com o quanto o modelo científico representa o modelo conceitual, as vantagens do modelo científico em relação a outros modelos conhecidos, as vantagens das técnicas de resolução e sua acessibilidade, a qualidade e a natureza das soluções obtidas, o nível de contribuição do modelo para o estado da arte e os requisitos da coleta de dados.

Neste capítulo, portanto, foram revisados temas chave para a fundamentação teórica e o desenvolvimento (seções 3.2 e 3.3), resolução (seções 0 e 3.3.2) e validação (seção 3.4) de um modelo científico que não possui similares na literatura (seção 3.1.10) e atende aos conceitos abordados na seção 2.6. Os modelos matemáticos com os respectivos métodos de resolução propostos nesta tese são detalhados no capítulo 4.

4 Modelo matemático e método de solução

Este capítulo apresenta propostas de modelo matemático para resolver o modelo conceitual, na seção 4.1, e de métodos de resolução deste modelo, na seção 4.2.

4.1 Modelagem do problema

A modelagem do problema foi um primeiro desafio desta pesquisa. Vários modelos científicos foram propostos para o planejamento e controle da produção de cana-de-açúcar, porém nenhum se ajustou à situação problema tratada nesta tese, conforme mostra a seção 3.1.11. Ou seja, faltava uma abordagem de otimização que tratasse a programação e o sequenciamento das frentes de colheita, visando equilibrar o suprimento à unidade fabril, o manejo varietal, a capacidade de colheita e de transporte, que, além de apoiar decisões de deslocamento das frentes de colheita, pudessem orientar o tipo de variedade nas áreas a serem plantadas futuramente, bem como o dimensionamento de veículos e colhedoras.

Duas analogias, uma com o VRPSDTW (seção 3.2 e Apêndice B) e outra com o GLSPPL (seção 3.3.1.7), foram investigadas para tratar o sequenciamento dos blocos de colheita por frente. Ambas as analogias envolveram revisão cuidadosa na literatura em termos de modelos científicos e métodos de solução. No entanto, não foram encontrados modelos científicos na literatura que controlem explicitamente as capacidades de colheita e transporte conforme o modelo conceitual apresentado na seção 2.7.

Esta seção enfatiza apenas a analogia que foi mais bem sucedida na pesquisa, utilizando a analogia com o GLSPPL. Os esforços de pesquisa para o desenvolvimento de um modelo, isto é a analogia com o VRPSDTW estão reportados no Apêndice B. A maior dificuldade encontrada foi na forma de tratar as restrições de capacidade de colheita e transporte. Primeiramente, pensou-se que estas capacidades deveriam ser consideradas pelo modelo em cada instante de tempo em que a frente de colheita mudasse de bloco. Entretanto, não foi encontrado nenhum equacionamento que pudesse ser diretamente aplicado para este tipo de análise. O Apêndice B mostra uma modelagem alternativa para duas frentes de colheita, no entanto, a generalização para mais de duas frentes aumentaria de maneira substancial o mínimo de variáveis e restrições do problema. Sendo assim, a literatura do GLSP é bastante rica no tratamento de macroperíodos e motivou a mudança de abordagem na modelagem do problema.

Neste capítulo, a seção 4.1.1 mostra o desenvolvimento de um modelo matemático e suas variantes para tratar o problema de pesquisa. Já a seção 4.1.2 testa, com

uma instância de dados pequena, se o comportamento dos modelos propostos acontece de acordo com o previsto no modelo conceitual.

4.1.1 Desenvolvimento do modelo matemático

Conforme mencionado anteriormente, a alternativa de modelagem é modificar o GLSPPL para representar o sequenciamento das frentes de colheita de cana-de-açúcar. No caso, foi escolhido o GLSPPL com conservação de *setup*, inspirado no estudo em Meyr (2002) e Meyr e Mann (2013), em que os produtos j seriam os blocos de colheita e as linhas de produção l seriam as frentes de colheita. A Tabela 4 mostra os índices e conjuntos envolvidos no modelo.

Tabela 4: Índices e conjuntos do modelo

Símbolo	Definição
i, j	bloco de colheita
m	tipo de colheita pertencente ao conjunto $M=(man, mec)$
l	frente de colheita
t	macroperíodo
S_t	conjunto de microperíodos s pertencentes ao macroperíodo t
SO_t	conjunto que contém o primeiro microperíodo s de t
F_m	conjunto de frentes l pertencentes ao tipo de colheita m
Bl_{jl}	conjunto de blocos j que podem ser colhidos pela frente de colheita l
BS_{jt}	conjunto de blocos j que podem ser colhidos no macroperíodo t
V_j	conjunto de blocos j que podem ser irrigados com vinhaça

Sendo assim, os blocos $j = 1..B$ devem ser sequenciados nas frentes de colheita $l = 1..F$ em um horizonte de tempo finito, dividido em macroperíodos $t = 1..T$. Cada bloco j , sendo $j = 1, \dots, B$, possui uma produtividade por hectare, TCH_j , e sua produção total estimada de p_j . Cada macroperíodo ainda pode ser subdividido em microperíodos não sobrepostos, com tamanhos variáveis. Cada frente de colheita possui uma definição específica de subperíodos. O conjunto S_t descreve os s microperíodos onde $s = 1, \dots, \sum_{t=1}^T |S_t| = N$ e SO_t representa o conjunto do primeiro microperíodo s de t (vide Figura 11).

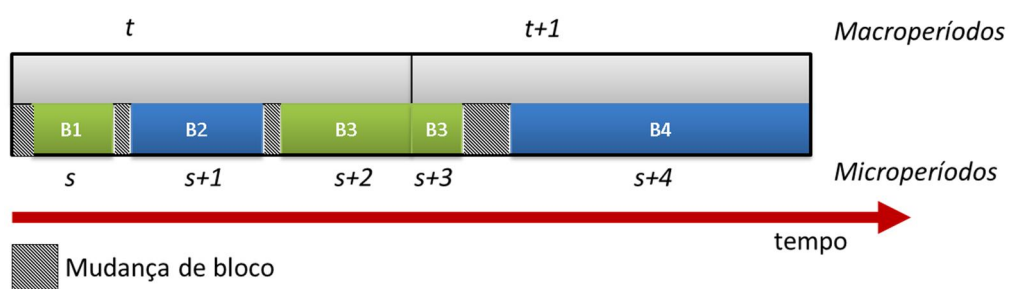


Figura 11: Relacionamento entre macro e microperíodos

O conjunto Bl_j representa os blocos j que podem ser colhidos pela frente de colheita l . O conjunto BS_{jt} representa a janela de tempo, períodos t , em que o bloco j pode ser colhido devido à idade, ao período de utilização industrial da variedade já plantada (seção 2.3), às exigências do fornecedor (seção 2.5.2), ao risco de incêndio (seção 2.5.4), de inundação (seção 2.5.5), à capacidade de retenção do solo (seção 2.5.6), às condições de trafegabilidade das estradas (seção 2.5.7) ou às determinações da gerência agrícola.

O tipo de colheita $m \in M$ pode ser manual ou mecanizada, sendo F_m o conjunto das frentes de colheita que pertencem ao conjunto M . Assim, em cada bloco j , f_{jm} representa a fração da produção do bloco com o tipo de colheita m . Para cada tipo de colheita m existe uma demanda de moagem para o macroperíodo t , dem_{mt} . Em todo macroperíodo t há uma quantidade mínima de área, vin_t , a ser liberada proveniente do conjunto V_j , que representa o conjunto dos blocos que possuem a fração f_{ij} possível de ser irrigado por vinhaça.

Cada frente l possui Nm_l máquinas (colhedoras ou carregadoras). O potencial de colheita do bloco j para o tipo de colheita m é dada por col_{mj} . As máquinas trabalham Ht_m horas por dia para o tipo de colheita m e possuem uma disponibilidade de trabalho idêntica para as l frentes de K_t horas por macroperíodo t . Nas horas trabalhadas por dia estão excluídos os tempos esperados com manutenções mecânicas e paradas de processo, como abastecimento de combustível, substituição de material de desgaste, horários de descanso de operadores, troca de turno de trabalho, dentre outros. Os tratores e/ou caminhões transbordos são suficientes para não limitar a produção das colhedoras.

O modo de transporte considerado é totalmente rodoviário com frota homogênea de Nt de caminhões, que trabalham Htt horas por dia. Assim, como no caso das colhedoras, nas horas trabalhadas por dia estão excluídos os tempos esperados com manutenções mecânicas e paradas de processo como abastecimento de combustível, horários de descanso de operadores, troca de turno de trabalho, dentre outros. A frota de veículos possui também uma disponibilidade de trabalho de K_t horas por macroperíodo t . Além disso, um caminhão pode ir para qualquer frente de colheita, seguindo uma regra de despacho dinâmico. Cada bloco j possui um potencial de transporte associado $transp_{mj}$ para o tipo de colheita m , que é função da capacidade de carga, da distância da usina e das condições da malha viária.

A perda de capacidade da frente de colheita durante suas mudanças de bloco é medida por meio do tempo de deslocamento, st_{ij} , entre o bloco i , de onde está partindo, ao bloco j , para onde está se deslocando. A quantidade de veículos com prancha, Np , disponíveis que possibilitam o transporte das colhedoras (geralmente de esteira) a longas distâncias, também influencia na velocidade do transporte das colhedoras. Uma mudança de área não necessita que toda cana-de-açúcar do bloco seja colhida, entretanto deve-se colher uma quantidade mínima, em toneladas, para o bloco j e a frente l , bm_{lj} , para que se justifique o deslocamento da frente. A Tabela 5 destaca os parâmetros envolvidos neste modelo. Cabe ressaltar que o bloco inicial da frente de colheita não aparece na Tabela 5, pois a frente pode começar a safra em qualquer bloco.

Tabela 5: Parâmetros do modelo

Símbolo	Definição
dem_{mt}	demanda da usina por tipo de colheita m e no período t (em toneladas)
p_j	produção do bloco j (em toneladas)
f_{jm}	fração do bloco j que pode ser colhido com o tipo de colheita m
vin_t	quantidade de área de vinhaça mínima a ser liberada no macroperíodo t
TCH_j	produtividade, em toneladas por hectare, do bloco j
fi_j	fração do bloco j que permite aplicação de vinhaça
col_{mj}	capacidade de colheita do bloco j com o tipo de colheita m (em toneladas por hora)
Np	unidades de transporte de equipamentos (prancha)
Nm_l	unidades de colheita (colhedoras) da frente l
Ht_m	horas trabalhadas das máquinas por tipo de colheita m
st_{ij}	tempo necessário para que uma frente vá do bloco i ao j
K_t	capacidade das frentes no período t (em tempo)
$transp_{mj}$	capacidade de transporte do bloco j com o tipo de colheita m (em toneladas por hora)
Nt	unidades de transporte (caminhões)
Htt	horas trabalhadas do transporte
bm_{lj}	tamanho mínimo do lote, ou seja, o tamanho mínimo do bloco j que viabiliza a mudança da frente de colheita l (em toneladas)

As variáveis de decisão deste estudo são semelhantes às utilizadas por Meyr (2002): y_{ljs} indica a localização da frente l no microperíodo s para processar o bloco j , z_{lij} indica a mudança de localização da frente l do bloco i para o j no microperíodo s e x_{ljs} representa a quantidade de matéria-prima produzida pela frente l do bloco j no microperíodo s . A Tabela 6 destaca as variáveis de decisão consideradas no modelo.

Tabela 6: Variáveis de decisão do modelo

Símbolo	Definição
x_{ljs}	produção do bloco j no microperíodo s pela frente l (em toneladas)
y_{ljs}	$\begin{cases} 1, & \text{se a frente } l \text{ está no bloco } j \text{ no micro período } s \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
z_{lijs}	$\begin{cases} 1, & \text{se a frente } l \text{ se dirige do nó } i \text{ para o } j \text{ no micro período } s \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Três modelos são apresentados nesta seção. Na verdade, pode-se considerar que o Modelo 1 é o modelo base proposto nesta tese, já os Modelos 1A e 1B são variações do primeiro como estratégias para a obtenção de soluções factíveis e melhores. Convém salientar que, em função dos valores paramétricos do modelo nas situações reais, as capacidades disponíveis são apertadas e os recursos envolvidos são escassos e, às vezes, encontrar uma solução factível, satisfazendo todas as restrições impostas pelo tomador de decisão, em geral, já é um problema difícil e esta solução já iria satisfazer o tomador de decisão. O Modelo 1, mais restritivo e dentro deste contexto, procura encontrar uma solução factível que maximize o momento da colheita que traria maior benefício à cana-de-açúcar plantada na área dentro de uma janela de tempo. Além disso, para considerar o tempo perdido com a mudança de área da frente (tempo de *setup*), o Modelo 1 possui restrições que descontam este tempo da capacidade da frente, seção 4.1.1.1.

Como descontar o tempo de deslocamento da frente da capacidade de colheita aumenta a complexidade do problema, vide seção 3.3.1.3, o Modelo 1A, seção 4.1.1.2, não considera a perda de capacidade com o deslocamento da frente na restrição de capacidade de colheita, mas busca minimizar este deslocamento na função objetivo. Desta maneira, o modelo deixa de considerar o melhor momento de colheita dentro de uma janela de tempo, em busca de uma solução factível para as demais restrições. Por fim, o Modelo 1B minimiza os custos de perda de moagem, bem como de não colher toda a matéria-prima na safra, seção 4.1.1.3, ambas as restrições nos modelos 1 e 1A. Neste modelo o tempo de deslocamento da frente é utilizado na capacidade de colheita, considerando variáveis de folga em algumas restrições que são penalizadas na função objetivo. A vantagem deste modelo é a de possuir uma solução factível trivial, isto é, não colher nada e pagar todo o custo da perda de moagem e da cana deixada no campo sem colher.

4.1.1.1 Modelo 1: Melhor período de colheita

A função objetivo do Modelo 1 leva em conta a preferência do tomador de decisão por colher determinado bloco j no macroperíodo t (y_{jt}) que pertença à janela de

tempo, ou seja, $(j, t) \in Bs_{jt}$. A Tabela 7 mostra os fatores que influenciam na determinação do ponderador γ_{jt} . O primeiro grupo de fatores considera: o fato da cana já estar plantada, o ciclo da variedade e o período de colheita (ou plantio) na última safra. Para cada uma destas situações, as células coloridas representam o período em que a janela de tempo está aberta. Já o segundo grupo, seria somado ao valor do primeiro grupo que está dentro da janela de tempo e é composto pelo risco de incêndio, de inundação, presença de solo arenoso, acesso por vias asfaltadas e por vias de terra argilosa.

Tabela 7: Fator ponderador γ_{jt} pertencente à função objetivo

	Cana plantada?	Ciclo	Último corte/ plantio	4	5	6	7	8	9	10	11
1	X	Precoce	Precoce	5	5	4					
2	X	Precoce	Média			5	4	3	2		
3	X	Precoce	Tardia					4	3	3	2
4	X	Média	Precoce	2	3	4	5	5	4		
5	X	Média	Média			4	5	5	4		
6	X	Média	Tardia				3	4	5	4	3
7	X	Tardia	Precoce	0	1	1	1	1	4	5	4
8	X	Tardia	Média				2	3	4	5	5
9	X	Tardia	Tardia						3	5	5
10				5	5	5	5	5	5	5	5
Fatores agravantes			<i>Risco de incêndio</i>	2	2	1	0	-2	-2	-2	-2
			<i>Risco de inundação</i>	-2	-2	1	2	2	1	-2	-2
			<i>Solo arenoso</i>	2	1	1	-2	-2	1	2	2
			<i>Estrada asfaltada</i>	2	2	1	0	0	1	2	2
			<i>Estrada de terra argilosa</i>	-2	-2	1	2	2	1	-2	-2

Por exemplo, a linha 1 representa uma área com o canavial já plantado com variedades de ciclo precoce e com o último corte realizado dentro do período programado, possui nota 5 para colher nos meses 4 e 5 e nota 4 para colher no mês 6 para reduzir o risco de colher fora do período. Neste caso o canavial possui idade adequada para corte 12 meses dentro do ciclo da variedade, caracterizando conformidade entre o manejo agrícola e a operação de colheita na safra anterior. Já a linha 3 representa um desvio entre o manejo agrícola e a operação de colheita, pois se trata de uma área com uma variedade de ciclo precoce plantada e colhida tardiamente. Assim, como haveria muita perda de quantidade e qualidade da matéria-prima em colher o canavial com cerca de sete meses no período recomendado para sua variedade, o planejador deve colher o mais próximo possível deste período, não ultrapassando uma idade mínima. Esta idade mínima depende do quanto o

tomador de decisão deseja sacrificar a qualidade e quantidade da matéria-prima na safra atual para obter melhor desempenho em safras futuras.

A linha 10 da Tabela 7 mostra que uma área com o canavial ainda não plantado e sem a interferência de algum fator agravante, possui nota 5 para qualquer período. Caso haja risco de incêndio (primeira linha dos fatores agravantes), nos dois primeiros meses receberia nota 7 e nos quatro últimos, nota 3, representando um incentivo à colheita nos períodos em que este risco é minimizado e um desincentivo em caso contrário.

Cabe ressaltar que estes valores representam uma sugestão de classificação dos blocos em termos do melhor momento de colheita, inspirados nos estudos de caso desta tese e na experiência do pesquisador com o problema. Recomenda-se que o especialista em planejamento da usina realize uma análise multicritério em conjunto com a equipe agrícola γ_{jt} levando em conta a conveniência com os fatores agrônômicos e logísticos relevantes à usina tratada. Ele pode inclusive investigar diferentes cenários para as ponderações de γ_{jt} , levando em conta outras informações não contidas nos parâmetros do modelo, assim como sua experiência no ambiente deste problema.

O Modelo 1 é descrito por:

$$\text{Max } \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^F \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \gamma_{jt} x_{ljs} \quad (47)$$

Sujeito à:

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} x_{ljs} \geq dem_{mt} \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (48)$$

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{s=1}^N x_{ljs} \leq p_j f_{jm} \quad (j = 1, \dots, B), (m = man, mec) \quad (49)$$

$$\sum_{m=man}^{mec} \sum_{l \in F_m} \sum_{j \in V_j} \sum_{s \in S_t} f_{ij} \frac{x_{ljs}}{TCH_j} \geq vin_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (50)$$

$$\sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{col_{mj} Nm_l Ht_m} x_{ljs} + \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{Nm_l}{Np} st_{ij} z_{lijs} \leq K_t \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (t = 1, \dots, T) \quad (51)$$

$$\sum_{m=man}^{mec} \sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{transp_{mj} NtHtt} x_{ljs} \leq K_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (52)$$

$$x_{ljs} \leq \min \left(\frac{col_{mj} Nc_l Htm}{24}, \frac{transp_{mj} NtHtt}{24} \right) K_t y_{ljs} \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (j = 1, \dots, B), (t = 1, \dots, T), \forall s \in S_t \quad (53)$$

$$x_{ljs} \geq bm_{lj} (y_{ljs} - y_{ljs-1}) \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (54)$$

$$\sum_{j \in (B_{S_{jt}} \cap B_{lj})} y_{ljs} = 1 \quad (l = 1, \dots, F), (t = 1, \dots, T), \forall s \in S_t \quad (55)$$

$$y_{lis-1} = \sum_{j=1}^B z_{lijs} \quad (l = 1, \dots, F), (i = 1, \dots, B), (s = 2, \dots, N) \quad (56)$$

$$\sum_{i=1}^B z_{lijs} = y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (57)$$

$$y_{ljs-1} \geq y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (t = 1, \dots, T), \forall s \in (S_t \setminus S0_t) \quad (58)$$

$$x_{ljs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (59)$$

$$y_{ljs} \in \{0,1\} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (60)$$

$$z_{lijs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, F), (i = 1, \dots, B), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (61)$$

A função objetivo (47) maximiza a preferência por colher os blocos nos períodos mais favoráveis dentro da janela de tempo. As restrições (48) e (49) garantem o balanço de massa, ajustando a produção no campo com a demanda da usina. As restrições (48) estão relacionadas à demanda de moagem da usina, garantindo que a quantidade de matéria-prima colhida e transportada de um determinado tipo de colheita seja maior que o valor demandado no período. Já as restrições (49) limitam a colheita e o transporte à disponibilidade de matéria-prima no bloco, estando, assim, relacionada à produção no campo, respeitando-se o tipo de colheita da frente e do bloco. As restrições (50) determinam a quantidade mínima de área de vinhaça que deve ser liberada em cada macroperíodo t , respeitando-se a quantidade de área irrigável no bloco.

As restrições (51) e (52) consideram a capacidade dos recursos de colheita e transporte. As restrições (51) relacionam o tempo consumido na produção dos recursos de colheita e o tempo consumido no transporte de equipamentos durante a mudança de área com o tempo total disponível no período. O tempo de produção dos recursos leva em conta as características de rendimento do bloco (seção 2.2.3.1), bem como a adequação agronômica para a colheita no período. O tempo de transporte dos equipamentos na mudança de área leva em conta o tempo gasto nesta mudança, bem como o número de veículos prancha disponíveis para esta operação. As restrições (52) tratam os recursos de transporte, cujo potencial de produção é considerado por bloco (seção 2.2.4.3). Neste caso, não é inserido o tempo gasto com a mudança da frente, pois no momento da mudança de área estes recursos podem transportar a produção das áreas em operação ou ficam ociosos consumindo estoque sobre rodas na unidade fabril. Além disso, como não há caminhões específicos por frente de colheita, pois eles podem ir a qualquer frente, este balanço de capacidade pode ser feito apenas para todos os períodos t , e não todas as frentes l e períodos t , como na restrição (51) em que a quantidade de colhedoras é definida por frente de colheita.

As restrições (53) a (55) acoplam as variáveis x_{ljs} e y_{ljs} . As restrições (53) garantem que quando há produção no bloco j pela frente de colheita l no micro período s , a

frente está posicionada no mesmo local e momento. Da mesma forma, para a situação oposta, quando a frente não está posicionada, não pode haver produção do bloco. Cabe ressaltar que o limitante superior de x_{ljs} foi considerado o mínimo entre a capacidade de colheita e transporte. Espera-se que a capacidade de colheita seja a mais restritiva, a não ser que uma frente tenha maior capacidade que toda a frota. As inequações (54) são as restrições de lote mínimo e definem uma quantidade mínima de matéria-prima a ser colhida. Embora esta restrição seja necessária quando a desigualdade triangular não é válida (seção 3.3.1.6), não é o caso deste modelo. Já as equações (55) garantem que a frente l estará em apenas um bloco j no microperíodo s . Por meio do parâmetro BS_{jt} estas restrições impõem que ocorra a colheita nos blocos j permitidos pelas janelas de tempo, ou seja, nos macroperíodos t . Além disso, por meio do parâmetro Bl_{jt} estas equações definem os blocos j que uma frente de colheita l pode colher. Isso ocorre caso seja necessária a setorização de alguma frente. Cabe ressaltar que são previamente fixados $y_{ljs} = 0$ para os microperíodos s que estão fora da janela de tempo do bloco j , bem como para as frentes l que não estão aptas a colhê-lo.

As restrições (56) e (57) definem o movimento da frente por meio da variável z_{lij_s} , consistente com as posições da frente no micro período s (y_{ljs}) e no micro período anterior $s-1$ (y_{lis-1}). Esta variável não necessita ser declarada como binária, pois não poderia assumir valores diferentes de 0 e 1, sendo y_{ljs} uma variável binária e estando z_{lij_s} penalizada na restrição (51). Cabe ressaltar que em (56) o primeiro microperíodo não é considerado devido ao fato da frente poder iniciar a safra em qualquer bloco de colheita. As restrições (58), embora sejam redundantes para a obtenção de uma solução ótima factível, estabelecem que os microperíodos ociosos ocorram apenas no final de cada macroperíodo, e com isso eliminam soluções equivalentes (simetrias). As restrições (59), (60), e (61) definem as variáveis não negativas x_{ljs} e z_{lij_s} , bem como a variável binária y_{ljs} .

4.1.1.2 Modelo 1A: Mínimo deslocamento das frentes

Em função das dificuldades para se resolver o Modelo 1, neste modelo, pensou-se em uma simples modificação dele para redução de sua complexidade e obtenção de uma solução factível. Maes *et al.* (1991) salientaram que a consideração da perda de tempo com a mudança de *setup* na restrição de capacidade, como nas restrições (12) e (51), aumenta a complexidade do modelo, vide seção 3.3.1.3. No Modelo 1A as restrições (51) passaram a ser simplesmente:

$$\sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{col_{mj} Nm_l Htm} x_{ljs} \leq K_t \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (t = 1, \dots, T) \quad (62)$$

Entretanto, como com esta modificação o tempo de *setup* deixa de ser considerado no modelo, altera-se a função objetivo para minimizar esse tempo de deslocamento das frentes de colheita, que seria:

$$\text{Min } \sum_{l=1}^F \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} Nm_l st_{ij} z_{lijs} \quad (63)$$

Cabe ressaltar que neste caso o número de pranchas Np pode ser suprimido por se tratar de uma constante.

Com estas modificações, o Modelo 1A, é descrito por:

$$\text{Min } \sum_{l=1}^F \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} Nm_l st_{ij} z_{lijs} \quad (64)$$

Sujeito à:

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} x_{ljs} \geq dem_{mt} \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (65)$$

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{s=1}^N x_{ljs} \leq p_j f_{jm} \quad (j = 1, \dots, B), (m = man, mec) \quad (66)$$

$$\sum_{m=man}^{mec} \sum_{l \in F_m} \sum_{j \in V_j} \sum_{s \in S_t} f_{lj} \frac{x_{ljs}}{TCH_j} \geq vin_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (67)$$

$$\sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{col_{mj} Nm_m} x_{ljs} \leq K_t \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (t = 1, \dots, T) \quad (68)$$

$$\sum_{m=man}^{mec} \sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{transp_{mj} NtHtt} x_{ljs} \leq K_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (69)$$

$$x_{ljs} \leq \min \left(\frac{col_{mj} Nc_l Nm_m}{24}, \frac{transp_{mj} NtHtt}{24} \right) K_t y_{ljs} \\ (m = man, mec), \forall l \in F_m, (j = 1, \dots, B), (t = 1, \dots, T), \forall s \in S_t \quad (70)$$

$$x_{ljs} \geq bm_{lj} (y_{ljs} - y_{ljs-1}) \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (71)$$

$$\sum_{j \in (BS_{jt} \cap Bl_{jt})} y_{ljs} = 1 \quad (l = 1, \dots, F), (t = 1, \dots, T), \forall s \in S_t \quad (72)$$

$$y_{lis-1} = \sum_{j=1}^B z_{lijs} \quad (l = 1, \dots, F), (i = 1, \dots, B), (s = 2, \dots, N) \quad (73)$$

$$\sum_{i=1}^B z_{lijs} = y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (74)$$

$$y_{ljs-1} \geq y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (t = 1, \dots, T), \forall s \in (S_t \setminus S0_t) \quad (75)$$

$$x_{ljs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (76)$$

$$y_{ljs} \in \{0,1\} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (77)$$

$$z_{lijs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, F), (i = 1, \dots, B), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (78)$$

4.1.1.3 Modelo 1B: Mínimos custos de deslocamento da frente, perda de moagem e não colher matéria-prima

No Modelo 1 as metas importantes para os tomadores de decisão, como o balanceamento entre oferta de matéria-prima e moagem da indústria, estão incorporadas nas restrições do modelo. Em função das dificuldades para resolver o Modelo 1, o Modelo 1B

pode ser considerado como uma simples variação dele em que foram inseridas variáveis de folga nas restrições de produção e demanda, sendo estas variáveis penalizadas na função objetivo com base em seu custo unitário. Desta maneira, enquanto o Modelo 1 procura gerar uma solução factível para a quantidade de recursos de colheita e transporte considerados, o Modelo 1B analisa os custos de perda de produção e o não cumprimento da demanda em possíveis soluções infactíveis para o Modelo 1, mas ainda possivelmente aceitável para o tomador de decisão. No Modelo 1B os custos de deslocamento da frente de colheita estão presentes na função objetivo, mas podem ser considerados como de segunda ordem, servindo principalmente como critério de desempate. Os parâmetros que penalizam estas variáveis na função objetivo também estão apresentados na Tabela 8 e as variáveis de decisão adicionais são lineares, não negativas e estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8: Parâmetros adicionais envolvidos

Símbolo	Definição
$[mind_{mt}, maxd_{mt}]$	demanda mínima e máxima da usina por tipo de colheita m e no período t (em toneladas)
mo	parâmetro que pondera a influência da perda de capacidade de moagem na função objetivo (custo de uma tonelada que deixa de ser moída)
bs	parâmetro que pondera a influência da perda de matéria-prima no campo na função objetivo (custo de uma tonelada que deixa de ser colhida)
md	parâmetro que pondera a influência da distância do deslocamento da frente em uma mudança de área na função objetivo (custo de um km percorrido no transporte de uma máquina)
$dist_{ij}$	distância entre os blocos i e j (em km)

Tabela 9: Variáveis de decisão adicionais

Símbolo	Definição
wm_{mt}	toneladas de moagem perdidas do tipo de colheita m no período t
wb_j	toneladas de matéria-prima deixada no bloco j

Do ponto de vista da demanda, se não há produção de matéria-prima nos blocos ou capacidade suficiente para colher e transportar a matéria-prima acima do limite mínimo de moagem, $mind_{mt}$, para o tipo de colheita m no período t , ocorre a falta de atendimento da demanda, que é medida pela variável de folga wm_{mt} . Conforme comentado anteriormente, a falta de matéria-prima provoca grandes prejuízos financeiros, além de grande tensão entre os elos da cadeia de produção. Uma das causas do prejuízo financeiro é o custo de reinício do processo que pode implicar em aumento do consumo de vapor e perda de eficiência da planta. Se desta parada resultar em deterioração de material em processo, esta

perda é maior ainda. Outra causa é a perda de faturamento por deixar de processar a matéria-prima em um período de pico de teor de açúcares, quando se pode extrair maior quantidade de açúcar e álcool de uma tonelada de matéria-prima. Caso haja operários industriais contratados apenas no período de safra, um dia trabalhado a mais representa um dia adicional de salários. O custo horário que relaciona todos estes fatores é mo , todavia seu valor é muito específico de cada usina e seu levantamento não é tão simples devido à dificuldade de separar estes fatores. A obtenção deste custo, portanto, é um ponto crítico para a utilização do Modelo 1B.

Também há perdas relacionadas à possibilidade de deixar de colher a cana-de-açúcar na safra corrente para colhê-la na safra seguinte, isto é, “bisar cana”, conforme jargão do setor. Esta perda está relacionada com a variável de folga wb_j do bloco j . Neste caso, além da perda ou adiamento do faturamento, pode haver perda de economias de escala por reduzir o total processado por safra. Este custo está representado por bs , cuja obtenção não é tão crítica como a de mo , pois se deve levar em conta a conversão em produtos finais obtidos de uma tonelada de cana, o preço de mercado destes produtos, o período de adiamento da produção, que pode ser até um ano, se há algum ganho de produtividade esperado ou perda de qualidade, bem como a taxa mínima atrativa de retorno.

Para quantificar o custo de transporte dos equipamentos, foi utilizado o parâmetro md , que representa o custo de deslocamento do veículo prancha por quilômetro e, por esta razão, utilizou-se a distância percorrida entre os blocos i e j , $dist_{ij}$. Este custo possui um papel secundário na função objetivo, servindo principalmente como um critério de desempate.

Como comentado anteriormente, para o modelo avaliar o impacto dos referidos custos, foram adicionadas variáveis de folga para as toneladas de moagem perdidas e para as toneladas de matéria-prima deixadas no campo sem colher (vide Tabela 9). Para cada um destes parâmetros há um custo por hora ou por tonelada (veja Tabela 8), e para que eles sejam considerados a função objetivo (47) é substituída por (79) abaixo.

$$\text{Min } mo \sum_{t=1}^T wm_{mt} + bs \sum_{j=1}^B wb_j + md \sum_{l=1}^F \sum_{j=1}^B \sum_{j=1}^B dist_{ij} z_{lij} \quad (79)$$

No caso da restrição que limita a moagem mínima, é inserida a variável de folga, substituindo as restrições (48) pelas restrições (80) e (81). Cabe ressaltar que (80) não deve ser uma igualdade devido ao fato que se o nível de moagem atingisse o máximo, então a variável de folga teria que ser negativa.

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} x_{ljs} + wm_{mt} \geq mind_{mt} \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (80)$$

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} x_{ljs} \leq maxd_{mt} \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (81)$$

Da mesma forma, para a matéria-prima não colhida, a variável de folga é inserida substituindo-se as desigualdades (49) pelas igualdades que seguem:

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{s=1}^N x_{ljs} + wb_j = p_j f_{jm} \quad (j = 1, \dots, B), (m = man, mec) \quad (82)$$

As restrições (83) e (84) estabelecem a não negatividade das variáveis inseridas.

$$wm_{mt} \geq 0 \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (83)$$

$$wb_j \geq 0 \quad (j = 1, \dots, B) \quad (84)$$

O Modelo 1B, portanto, é descrito por:

$$\text{Min } mo \sum_{t=1}^T wm_{mt} + bs \sum_{j=1}^B wb_j + md \sum_{l=1}^F \sum_{j=1}^B \sum_{j=1}^B dist_{ij} z_{lij} \quad (85)$$

Sujeito à:

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} x_{ljs} + wm_{mt} \geq mind_{mt} \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (86)$$

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} x_{ljs} \leq maxd_{mt} \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (87)$$

$$\sum_{l \in F_m} \sum_{s=1}^N x_{ljs} + wb_j = p_j f_{jm} \quad (j = 1, \dots, B), (m = man, mec) \quad (88)$$

$$\sum_{m=man}^{mec} \sum_{l \in F_m} \sum_{j \in V_j} \sum_{s \in S_t} f_{ij} \frac{x_{ljs}}{TCH_j} \geq vin_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (89)$$

$$\sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{col_{mj} Nm_l Ht_m} x_{ljs} + \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{Nm_l}{Np} st_{ij} z_{lijs} \leq K_t \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (t = 1, \dots, T) \quad (90)$$

$$\sum_{m=man}^{mec} \sum_{l \in F_m} \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \frac{24}{transp_{mj} NtHtt} x_{ljs} \leq K_t \quad (t = 1, \dots, T) \quad (91)$$

$$x_{ljs} \leq \min \left(\frac{col_{mj} Nc_l Ht_m}{24}, \frac{transp_{mj} NtHtt}{24} \right) K_t y_{ljs} \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (j = 1, \dots, B), (t = 1, \dots, T), \forall s \in S_t \quad (92)$$

$$x_{ljs} \geq bm_{lj} (y_{ljs} - y_{ljs-1}) \quad (m = man, mec), \forall l \in F_m, (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (93)$$

$$\sum_{j \in (Bs_{jt} \cap Bl_{jl})} y_{ljs} = 1 \quad (l = 1, \dots, F), (t = 1, \dots, T), \forall s \in S_t \quad (94)$$

$$y_{lis-1} = \sum_{j=1}^B z_{lijs} \quad (l = 1, \dots, F), (i = 1, \dots, B), (s = 2, \dots, N) \quad (95)$$

$$\sum_{i=1}^B z_{lijs} = y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (96)$$

$$y_{ljs-1} \geq y_{ljs} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (t = 1, \dots, T), \forall s \in (S_t \setminus S0_t) \quad (97)$$

$$x_{ljs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (98)$$

$$y_{ljs} \in \{0,1\} \quad (l = 1, \dots, F), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (99)$$

$$z_{lijs} \geq 0 \quad (l = 1, \dots, F), (i = 1, \dots, B), (j = 1, \dots, B), (s = 1, \dots, N) \quad (100)$$

$$wm_{mt} \geq 0 \quad (t = 1, \dots, T), (m = man, mec) \quad (101)$$

$$wb_j \geq 0 \quad (j = 1, \dots, B) \quad (102)$$

4.1.2 Experimentos com o problema teste

Nesta seção foi elaborado um exemplo realista, porém reduzido, do problema da programação das frentes de colheita. Esse problema teste envolve um número de variáveis e restrições suficientemente pequeno para permitir a obtenção da solução ótima dos modelos da seção 4.1.1 via *solver* (CPLEX 12.5.1.0), com relativamente baixo tempo computacional. A intenção é a de verificar se os modelos capturam os comportamentos esperados, ou seja, se representam adequadamente, em alguns aspectos testáveis, o modelo conceitual, vide seção 1.2 e 2.7. Dessa forma, alguns dados levantados são fictícios para estes experimentos, para facilitar a verificação dos modelos. Esses dados foram baseados em valores que são utilizados como premissas de planejamento na Empresa α , para efeito de pré-projetos e pré-planejamento, balizados de acordo com um levantamento periódico de indicadores em mais de 30 usinas de várias regiões do Brasil.

A seção 4.1.2.1 apresenta os dados de entrada que são base para os experimentos realizados. Já a seção 4.1.2.2 mostra e analisa os experimentos efetuados para os modelos apresentados na seção 4.1.1.

4.1.2.1 Dados de entrada

Este exemplo representa o sequenciamento de duas frentes com gestão própria para uma usina com moagem de 4.500 t/dia em um período de apenas duas semanas, sendo que cada semana representa um macroperíodo. Cabe ressaltar que esta configuração não é típica, mas foi aqui usada por resultar em um número suficientemente pequeno de variáveis inteiras. PECEGE (2012) considera uma usina referência moendo 2.400.000 toneladas na safra, que em 200 dias efetivos de safra resultaria em uma moagem de 12.000 toneladas por dia.

Considerou-se uma moagem de 31.500 (dem_{mt}) toneladas por semana. O tempo disponível para as frentes é de 168 (K_t) horas por semana. Para suprir a moagem, existem 4 blocos com 17.000 (p_j) toneladas de matéria-prima para serem colhidas mecanicamente. Esta quantidade de blocos também é hipotética para reduzir o tamanho do modelo. Blocos de 17.000 toneladas são possíveis, mas não são comuns nas usinas. Um tamanho de bloco mais comum seria entre 3.000 e 7.000 toneladas, dependendo da estrutura fundiária da unidade.

As horas trabalhadas por recurso são de 15 (Ht_m) horas para uma máquina (colheita manual e mecanizada) e 16,6 (Htt) horas para o caminhão. Estes valores de horas trabalhadas são característicos de boas operações de colheita e transporte. Cabe ressaltar que

destes números foram excluídos os tempos improdutivos, gastos com manutenção e com paradas de processo, como, por exemplo, horário de refeição.

Tabela 10: Parâmetros dos blocos de colheita

Blocos	Prod. (t)	X'	Y'	Dist. (km)	Vel. (km/h)	Campo (min)	Usina (min)	Ciclo (h)	Cargas	Dens. (t/cg)	Transp. (t/h)	Col. (t/h)
1	17.000	0	-15	15,0	30	35	25	2,0	2	32	32	30
2	17.000	-5	5	7,1	30	35	25	1,5	2	32	43	42
3	17.000	0	-5	5,0	20	35	25	1,5	2	32	43	42
4	17.000	-5	-15	15,8	30	35	25	2,1	2	32	31	30
Total	68.000	<i>Média</i>		10,7	28	35	25	1,8	2	32	37	36

A Tabela 10 mostra os dados dos blocos de colheita, sendo que a usina se encontra na coordenada (0,0). Nesta tabela também são fornecidas as coordenadas do centro de cada bloco, obtidas com facilidade com dispositivos de GPS utilizados nas usinas. Cabe ressaltar que em um caso real seriam comparados os valores de distância medidos entre a usina e cada bloco, geralmente obtidos com facilidade, com a distância Euclidiana entre estes pontos. A relação entre estes dois valores resultariam em um conversor da distância Euclidiana para a distância real. Aplicando esta relação a qualquer distância Euclidiana, é obtido um estimador da distância entre os blocos de colheita; que, na prática, é bastante incompleta nas usinas devido à quantidade de combinações possíveis.

O potencial de transporte para colheita mecanizada ($transp_{mj}$) foi obtido por meio da equação (5) da seção 2.2.4.3 para distâncias bastante próximas da usina. PECEGE (2012) utiliza como raio médio das áreas de expansão 22km e das áreas tradicionais 28km. O raio médio é um informação de fácil obtenção nas usinas, pois é utilizado para pagamento de fornecedores de cana e terceiros. Em geral a distância da usina até cada fazenda é medida e o número é inserido no cadastro agrícola.

O valor da velocidade média dos caminhões é típico para raios de 15km e 5km, sendo que 30km/h para um raio de 7km indica boas condições do sistema viário. Os tempos de campo e usina são razoavelmente altos para uma operação de bate-e-volta, que no campo poderia ser de 25 minutos e na usina, 20 minutos em uma condição média. Estes valores podem ser obtidos de várias maneiras. A mais comum é obter o tempo de saída e chegada na usina via sistema de pesagem de cana-de-açúcar e os tempos de chegada e saída da palhada por meio da anotação do motorista. Com estas marcas de tempo é possível calcular os tempos de ida e volta, que, relacionados com a distância, resultam nas velocidades, conforme mostra a equação (4) da seção 2.2.4.3. A densidade de carga apresenta um valor típico para unidades

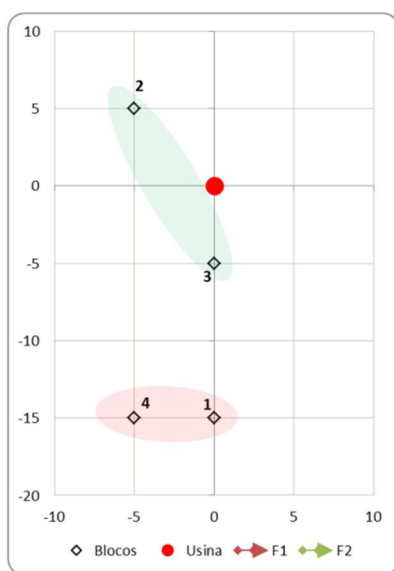
de carga com 12,5m de comprimento. Estes valores são obtidos por meio do sistema de pesagem de matéria-prima.

O potencial de colheita mecanizada (col_{mj}) pode ser calculado por meio da equação (1) da seção 2.2.3.1. A Tabela 11 mostra os dois padrões de rendimento de colheita. R1 representa um rendimento acima da média, enquanto que R2 é mediano para baixo. As produtividades indicam um canavial não muito produtivo. Estes valores são obtidos por meio de estimativas de campo, bem como avaliações relacionando produtividade com variedade e estágio de corte. Os tamanhos de tiro de colheita indicam que R2 é uma área estreita e R1, uma área mediana. É esperado que em áreas estreitas possam-se ter tempos de manobra maiores. Estes últimos dois parâmetros podem ser obtidos por uma avaliação do especialista com base em mapas e visitas a campo, bem como por meio de medições proporcionadas por computadores de bordo e levantamentos topográficos.

Tabela 11: Rendimentos de colheita

Parâmetros	R1	R2	Unidade
Velocidade média trabalhando	4,5	5,0	<i>km/h</i>
Produtividade	76,0	62,0	<i>t/ha</i>
Tiro médio	0,60	0,30	<i>km</i>
Espaçamento	1,5	1,5	<i>m</i>
Tempo médio de manobra	1,5	2,0	<i>min</i>
Velocidade média geral	3,8	3,2	<i>km/h</i>
t/h média geral	43,2	29,9	<i>t/h/máq</i>
Horas trabalhadas	15	15	<i>h/dia</i>
t/dia efetivo	648	448	<i>t/dia/máq</i>

O Gráfico 1 mostra o posicionamento dos blocos e da usina geograficamente. Em verde estão os blocos com melhor rendimento de colheita e em vermelho com os piores rendimentos. Percebe-se também que os blocos 2 e 3 estão mais próximos da usina e, portanto, possuem maior capacidade de transporte do que os blocos 1 e 4.

Gráfico 1: Posicionamento dos blocos e usina

A Tabela 12 mostra as distâncias e os tempos de deslocamento entre os blocos de colheita. Para o cálculo da distância, foi utilizado um fator de ajuste de 30% acima da distância Euclidiana. Nas situações reais, este fator poderia ser levantado por meio da comparação das distâncias radiais (bloco – usina), medidas pela usina e calculadas pela distância Euclidiana. Já para a conversão da distância em tempo, considerou-se um tempo de embarque e desembarque de 30 minutos, uma velocidade média de 40 km/h e uma eficiência de 85%.

Tabela 12: Distância e tempo de deslocamento entre os blocos

Blocos	<i>distância em km-dist(i,j)</i>				<i>tempo em horas-st(i,j)</i>			
	b1	b2	b3	b4	b1	b2	b3	b4
b1	0	27	13	7	0,0	2,0	1,6	1,4
b2	27	0	15	26	2,0	0,0	1,6	1,9
b3	13	15	0	15	1,6	1,6	0,0	1,6
b4	7	26	15	0	1,4	1,9	1,6	0,0

A Tabela 13 mostra o conjunto de blocos em que a colheita é permitida dos macroperíodos (BS_{jt}). Percebe-se que o bloco 2 não pode ser colhido no primeiro período e o bloco 4 não pode ser colhido no segundo. A Tabela 13 também mostra o peso atribuído à colheita do bloco em cada macroperíodo (γ_{jt}), utilizada apenas no Modelo 1, seção 4.1.1.1. Por exemplo, apesar de b2 poder ser colhido nos dois períodos, colhê-lo em P1 é melhor que em P2. Já no caso de b3 ocorre o inverso, é melhor colhê-lo em P2.

Tabela 13: Conjunto dos períodos permitidos para a colheita e melhores momentos de colheita dentro da janela de tempo

	Bs_{jt}		γ_{jt}	
	P1	P2	P1	P2
b1	1		5	
b2	1	1	5	4
b3	1	1	4	5
b4	1		5	

Ao utilizar o Modelo 1B (seção 4.1.1.2) é necessário inserir na função objetivo os custos de perda de moagem, de cana bisada e da mudança das frentes. No exemplo, o custo de perda de moagem (*mo*) foi considerado de R\$144,00 por tonelada. A apuração deste custo é bastante controversa nas usinas, pois envolve uma série de custos indiretos como a dispensa de funcionários da usina na entressafra ou redução de seus salários, o custo de capital e depreciação da instalação, deterioração de material em processo, perda de oportunidade de processar a matéria-prima com teor de açúcares mais alto, bem como o risco de deixar de processar a matéria-prima na safra. O custo da cana bisada (*bs*) foi considerado R\$5,00. A apuração deste custo também é controversa, pois, de uma maneira simplista, trata-se apenas de um adiamento do processamento da matéria-prima e do respectivo faturamento. No entanto, pode implicar também em perda de qualidade da matéria-prima, bem como das condições de colheitabilidade. O custo da mudança de área (*md*) baseou-se no preço do diesel de R\$2,10 e um consumo de 5 km/l, resultando em R\$0,42/km. Este custo de mudança pode ser considerado de segunda ordem se comparado com os outros.

Para avaliar se o custo do superdimensionamento de recursos frente ao custo de perda de moagem foram estimados os custos de ociosidade de colheita e transporte. A Tabela 14 mostra o cálculo do custo de hora parada da colheita e a Tabela 15, o custo de hora parada do transporte, que são custos que não estão presentes no modelo, mas são utilizados para a análise das soluções.

Tabela 14: Custos de ociosidade de colheita por hora

	Colhedora	Trator	Unidade de Transbordo	Total
<u>Custo de capital/depreciação</u>				
Valor do equipamento (R\$)	800.000	200.000	80.000	
Período depreciação (anos)	5	8	15	
Valor residual (R\$)	100.000	100.000	-	
Custo anual (R\$)	206.187	32.130	11.746	250.063
<u>Custo de mão-de-obra</u>				
Salário mensal safra (R\$)	2.500	1.800		
Salário mensal entressafra (R\$)	1.500	1.000		
Encargos	100%	100%		
Custo anual (R\$)	52.000	36.800		88.800
Quantidade	1	2	4	
Custo anual total (R\$)	258.187	137.861	46.984	443.031
Custo por tonelada (R\$/h)	52,73	28,16	9,60	90,49

Para o caso destes valores, consideram-se os custos de capital e depreciação para todos os equipamentos, bem como de pessoal para colhedora, trator e caminhão. Foi considerada uma taxa mínima atrativa de retorno de 12% a.a., oito meses de safra e 85% de eficiência de moagem da usina.

Tabela 15: Custos de ociosidade de transporte por hora

	Caminhão	Unidade de carga	Total
<u>Custo de capital/depreciação</u>			
Valor do equipamento (R\$)	450.000	200.000	
Período depreciação (anos)	8	15	
Valor residual (R\$)	220.000	-	
Custo anual (R\$)	72.700	29.365	102.065
<u>Custo de mão-de-obra</u>			
Salário mensal safra (R\$)	2.500		
Salário mensal entressafra (R\$)	1.500		
Encargos	100%		
Custo anual (R\$)	52.000		52.000
Quantidade	1	6	
Custo anual total (R\$)	124.700	176.189	300.889
Custo por tonelada (R\$/h)	25,47	35,99	61,46

4.1.2.2 Resultados e discussões

Os modelos 1, 1A e 1B foram codificados em GAMS 24.1.3 e resolvidos otimamente pelo CPLEX 12.5.1.0. Os experimentos foram realizados em um PC Intel(R) i7 2600 com 8 núcleos de 3,4 GHz cada e uma memória de 16GB. Os experimentos envolveram 185 restrições e 235 variáveis, sendo 32 variáveis discretas. O tempo para a obtenção da solução ótima foi menor que 0,5 segundos.

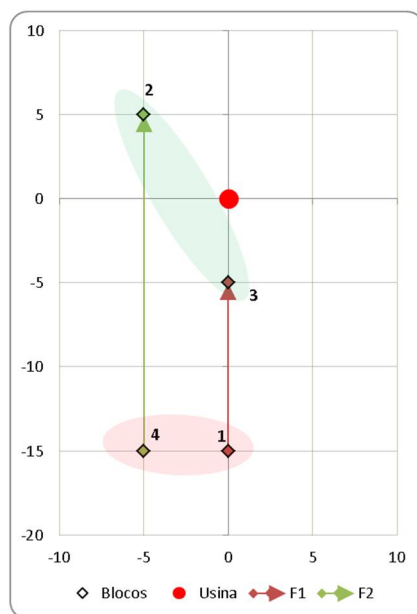
4.1.2.2.1 Testes com o Modelo 1

Para este modelo, foram realizados sete experimentos em que foram analisadas as influências dos parâmetros que sinalizam os melhores momentos para a colheita dentro da janela de tempo (γ_{jt}), a janela de tempo para a colheita (BS_{jt}), e as alterações dos tipos de colheita dentro das áreas (f_{jm}) e (F_m). Os recursos de colheita e transporte estão em abundância para os testes realizados (10 colhedoras e 11 caminhões).

O Experimento 1.1 utiliza as janelas de tempo e os melhores momentos de colheita dentro da janela de tempo, de acordo com a Tabela 13. O tipo de colheita da frente F1 é manual e o de F2 é mecanizado. Os blocos B1 e B3 permitem apenas colheita manual enquanto B2 e B4 permitem colheita mecânica. Neste caso, espera-se que as frentes colham apenas as áreas com o tipo de colheita adequado e respeitando as janelas de tempo que não permitem a colheita dos blocos B1 e B4 no segundo período. Além disso, as restrições de colheita a transporte devem ser respeitadas de acordo com a disponibilidade de tempo destes recursos.

O Gráfico 2 mostra o movimento das frentes F1 e F2 neste experimento, que se mostrou condizente com o esperado. Os blocos B1 e B4 que não podem ser colhidos no segundo período foram colhidos primeiro, assim como o tipo de colheita de cada bloco foi respeitado pela frente de colheita. Neste caso, havia folga de capacidade dos recursos de colheita e transporte, pois colheram simultaneamente áreas com pior colheitabilidade e mais distantes, depois foram para os blocos próximos e com boa colheitabilidade. Além disso, a folga de capacidade permitiu que as frentes fizessem deslocamentos longos sem comprometer o suprimento, como o de B4 para B2, com 26km de distância entre eles, ao invés de B4 para B1, com apenas 7km. Cabe ressaltar que o deslocamento de B4 para B1 também não seria permitido pelas restrições de janela de tempo e de tipo de colheita. Estas restrições também não permitem que haja outra escolha do momento de colheita. Neste caso, a função objetivo totalizou 316.750, equivalente a uma nota de 4,75 com 66.750 toneladas processadas.

Gráfico 2: Movimento das frentes: Exp. 1.1



Cabe ressaltar que quanto maior o valor da função objetivo, maior a quantidade de matéria-prima colhida no melhor momento dentro da janela de tempo possível. Este melhor momento para a colheita é representado por γ_{jt} , que foi discutido na seção 4.1.1.1 e deve ser cuidadosamente determinado pelo especialista em planejamento juntamente com a equipe agrícola da usina, possuindo notas de 1 a 5.

Nos experimentos 1.2 e 1.3, as janelas nos dois períodos considerados foram liberadas, assim como γ_{jt} foi modificado. A Tabela 16 mostra os valores de γ_{jt} para ambos os experimentos. Como o tipo de colheita prevalece para as frentes e blocos, os blocos a serem colhidos pelas frentes se mantêm, porém a sequência de colheita é alterada. No experimento 1.2, ambos os movimentos de F1 são permitidos, todavia o que garante a maximização do momento de colheita é colher B1 no primeiro período e B3 no segundo, pois possuem nota 5 nestes momentos, caso contrário receberiam nota 4 em ambos os casos. Já no caso de F2, seu movimento é indiferente em termos do momento de colheita, pois os blocos possuem mesmas notas nos períodos. No entanto, quando combinado com a capacidade de colheita, F2 processa B2 em menor tempo, devido à sua colheitabilidade, e ainda sobra tempo para processar parte de B4 no primeiro período. No caso do experimento 1.1 isto não é possível, pois a janela de tempo não permite colher B4 no primeiro período. No experimento 1.3, espera-se entender o efeito da mudança da nota de B4 em P2.

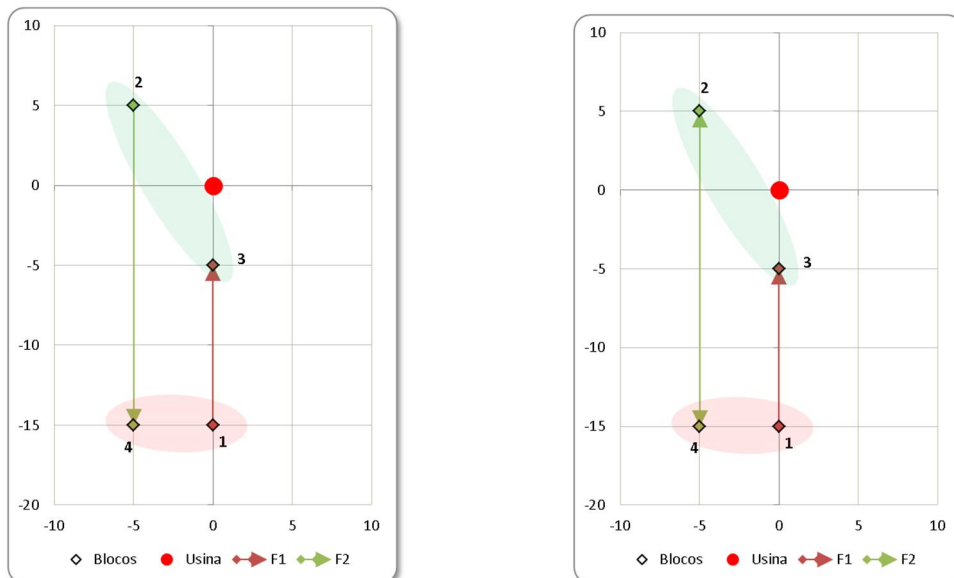
Tabela 16: Valores de γ_{jt} para os experimentos 1.2 e 1.3

	Exp. 1.2		Exp. 1.3	
	P1	P2	P1	P2
b1	5	4	5	4
b2	5	4	5	4
b3	4	5	4	5
b4	5	4	5	3

O Gráfico 3 (a) e (b) mostra o movimento das frentes de colheita nos experimentos 1.2 e 1.3, respectivamente. Como previsto, no experimento 1.2, a frente se movimenta de B2 para B4, diferentemente do experimento 1.1. O valor da função objetivo é de 324.250, equivalente a uma média de 4,77, com 68.000 toneladas processadas. Estes valores são superiores ao experimento anterior, pois a frente processou mais toneladas de cana devido à mudança da janela de tempo comentada anteriormente.

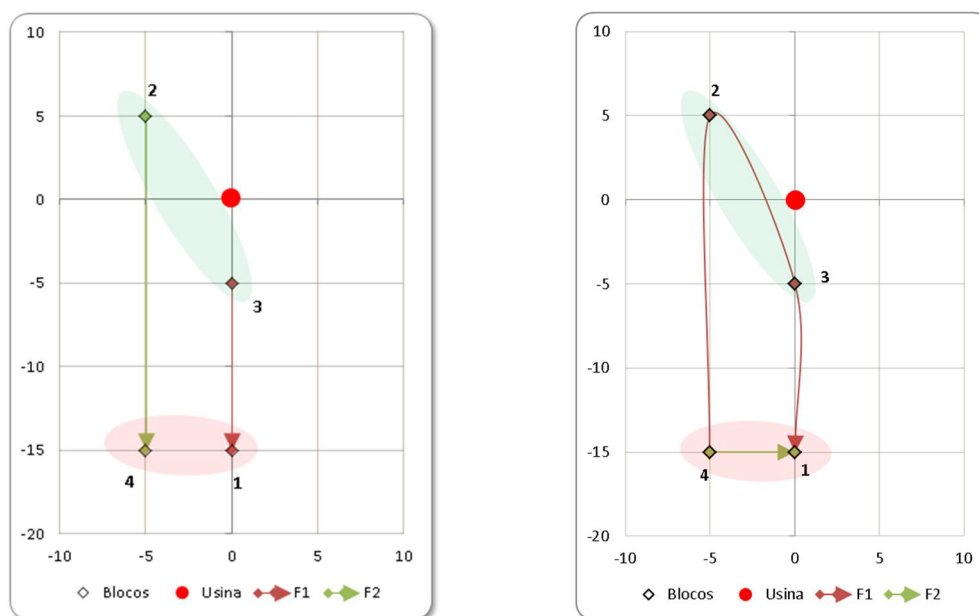
Já no experimento 1.3 percebe-se que a movimentação da frente 2 se altera novamente, colhendo primeiro B4, depois B2 e retorna a B4. Neste caso, como não é penalizado o deslocamento e busca-se maximizar $\sum_{l=1}^F \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \gamma_{jt} x_{ljs}$, a solução ótima apresentou mais um deslocamento para aumentar a produção da usina nos períodos. Entretanto, apesar de produzir as mesmas 68.000 toneladas do exemplo anterior, o valor da função objetivo reduziu para 320.500, equivalente a uma nota média de 4,71. O valor absoluto da função objetivo menor é um resultado esperado já que a nota de B4 em P2 é inferior à do experimento 1.2.

Gráfico 3: Movimento das frentes: (a) Exp. 1.2, (b) Exp. 1.3



Nos experimentos 1.4 e 1.5, foi considerada proibida a colheita de B1 em P1 e mantidos os mesmo valores de γ_{jt} do experimento 1.2. No caso de 1.5, determinou-se que todos os blocos poderiam ser colhidos mecanicamente e, portanto, as duas frentes estariam adequadas a este tipo de colheita. O Gráfico 4 (a) e (b) mostra o movimento das frentes destes dois experimentos.

Gráfico 4: Movimento das frentes: (a) Exp. 1.4, (b) Exp. 1.5



Como esperado, se comparado ao experimento 1.2, o experimento 1.4 apresentou apenas a mudança do sentido do movimento de F1 devido à proibição da colheita de B1 em P1. Entretanto, também houve redução do valor da função objetivo para 283.375, equivalente a uma nota de 4,27 com uma produção de 66.375 toneladas. Esta redução é explicada pelo fato desta proibição ter obrigado F1 a colher B3 em P1, quando ela possui nota 4 ao invés de 5 no experimento anterior, bem como ao fato de haver reduzido a produção devido à limitação de F1 em P2.

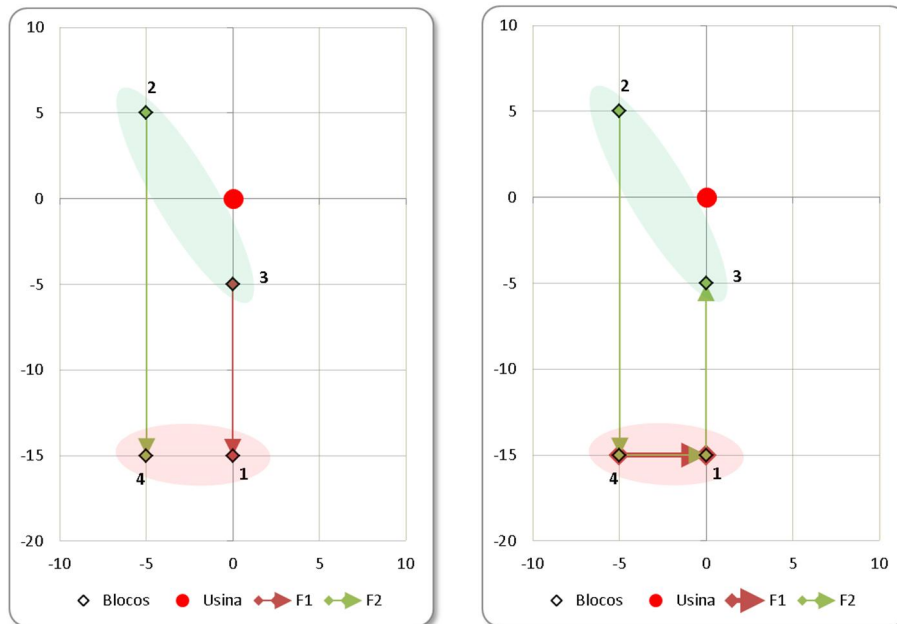
No experimento 1.5 foi dada maior mobilidade às frentes de colheita, ao permitir que ambas colham qualquer bloco. Dessa forma, o Gráfico 4 (b) mostra que F2 colheu as áreas de menor colheitabilidade, enquanto que F1 colheu as áreas mais produtivas e foi auxiliar F2 a iniciar B4 e concluir B1. Neste caso, o valor da função objetivo foi 323.000, equivalente a uma nota de 4,75. Como havia capacidade excedente de colheita, foi possível que F1 se deslocasse mais para colher B3 com nota máxima, sem deixar produção remanescente. No entanto, após observar deslocamentos da frente que não utilizam o menor

caminho, a função objetivo foi modificada para aprimorar a qualidade da solução apresentada. Assim, a equação (47) foi substituída por:

$$Max \sum_{l=1}^F \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} \gamma_{jt} x_{ljs} - \alpha \sum_{l=1}^F \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_t} Nm_{l} s t_{ij} z_{lij} s \quad (103)$$

Sendo α um valor pequeno, fazendo com que a segunda parcela da equação atue como um critério de desempate. Os experimentos 1.4' e 1.5' utilizam os mesmos dados dos dois anteriores, mas com a função objetivo (103) e $\alpha = 0,001$. O Gráfico 5 (a) e (b) mostra o movimento das frentes nestes dois novos experimentos.

Gráfico 5: Movimento das frentes: (a) Exp. 1.4', (b) Exp. 1.5'



No caso do experimento 1.4', o comportamento foi idêntico ao do experimento 1.4, tanto em termos do movimento das frentes quanto dos valores da função objetivo e produção obtida. Já no caso dos experimentos 1.5 e 1.5', ao invés de F2 ir de B4 para B2, depois para B3 e finalmente para B1, faz o caminho mais curto, indo de B2 para B4, depois para B1 e finalmente para B3. O valor da função objetivo de 1.5' também não se altera significativamente, 322.999,9687, em 1.5 é de 323.000,0000.

Nesta subseção, portanto, foram realizados sete experimentos para analisar o comportamento do Modelo 1 em relação a mudanças nos seus parâmetros. Os parâmetros testados foram: a definição das janelas de tempo, as notas atribuídas ao melhor período de colheita dentro da janela de tempo, bem como tipo de colheita dos blocos e frentes. O

comportamento do modelo ocorreu dentro do esperado em todas as situações e as soluções obtidas foram consistentes e compatíveis com a experiência prática do autor neste problema. Além disso, dois experimentos mostraram o comportamento do modelo com uma pequena alteração da função objetivo, passando a considerar também o deslocamento das frentes como um critério de desempate. Esta modificação melhorou um pouco a qualidade da solução nos experimentos que tiveram recursos de colheita e transporte em excesso.

4.1.2.2.2 Testes com o Modelo 1A

Como mencionado anteriormente, o Modelo 1A recorre ao resultado reportado por Maes *et al.* (1991) e procura evitar o aumento de complexidade do problema quando o tempo de *setup* aparece na restrição de capacidade. Desta forma, no modelo 1A o tempo de *setup* é apenas minimizado na função objetivo. Além disso, neste modelo, uma perda média de tempo com a mudança de área é estimada e subtraída das horas trabalhadas das colhedoras, que é uma prática aceitável dentro do setor para dimensionamento destes recursos. Assim, a maximização da escolha do melhor momento de colheita dentro de uma janela de tempo do Modelo 1 é substituída pela minimização do tempo de deslocamento das máquinas das frentes de colheita no Modelo 1A na função objetivo.

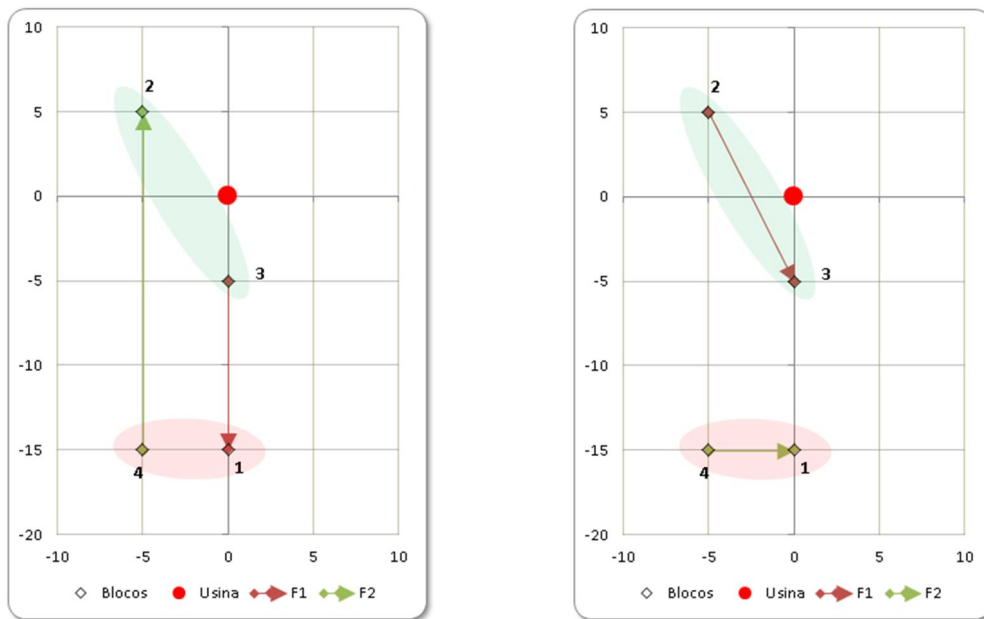
Para o Modelo 1A, foram realizados dois testes baseados nos experimentos 1.4 e 1.5 para demonstrar o impacto das premissas diferentes deste modelo. Para o cálculo das horas trabalhadas, foi analisado o tempo médio de mudança na Tabela 12 (b), que resultou em 1,7 horas. Estimou-se que as frentes fariam até três mudanças de frente neste período, equivalente a 1,5 mudanças cada frente. Com isso, o tempo diário de trabalho das colhedoras reduziria de 15 para 14,78 horas, pois haveriam 5,1 horas de deslocamento em duas semanas com 336 horas disponíveis.

O Gráfico 6 (a) e (b) mostra o movimento das frentes de colheita nos experimentos 1A.1 e 1A.2, que correspondem aos experimentos do Modelo 1 1.4 e 1.5, respectivamente. Espera-se que nestes experimentos a minimização do deslocamento tenha um peso maior e, portanto, não justificará deslocamento das frentes adicionais para produzir acima da moagem mínima.

De acordo com o esperado em ambos experimentos, a produção foi de 63.000 toneladas no período, ao invés de 66.375 toneladas nos experimentos 1.4/1.4' e 1.5/1.5' da seção 4.1.2.2.1, pois o Modelo 1 busca colher mais cana-de-açúcar desde que haja capacidade de colheita e transporte, bem como matéria-prima disponível, enquanto o Modelo 1A visa atender à quantidade mínima de moagem. Estas diferentes funções objetivo dos modelos 1 e

1A também gera outra diferença entre os resultados dos modelos, pois o valor da função objetivo do Modelo 1 aplicada ao experimento 1A.1 é de 267.750, inferior aos valores obtidos em 1.4 e 1.4', 283.375 para ambos. Além das alterações na quantidade de produção e no valor da função objetivo, a solução do experimento 1A.1 não apresentou grandes alterações em relação aos experimentos equivalentes da seção anterior.

Gráfico 6: Movimento das frentes (a) Exp. 1A.1 (b) Exp. 1A.2



Já no caso do experimento 1A.2, diferentemente de 1.5 e 1.5' em que o objetivo foi a obtenção da maior quantidade de matéria-prima em bons momentos de colheita, quando as janelas de tempo ou o tipo de colheita não foram restritivos, o deslocamento das frentes de colheita foi o mínimo possível. Em 1.5 e 1.5', na média das duas frentes foram gastos 3,2 e 3,1 horas, respectivamente, com o deslocamento de cada máquina. Entretanto, a frente que mais se deslocou em cada um dos cenários gastou 5,1 e 4,9 horas, respectivamente, e a com menor deslocamento, 1,4 horas em ambos os cenários. Cabe ressaltar que as premissas de horas trabalhadas para o Modelo 1A estão bem ajustadas para as frentes que tiveram maior deslocamento. Entretanto, em 1A.2, os tempos gastos com o deslocamento das frentes foram em média 1,5, bastante inferior ao que foi considerado no recálculo das horas trabalhadas.

Apesar do Modelo 1A representar a situação do problema com menor grau de realismo, a perda de capacidade das frentes de colheita devido ao seu deslocamento e também ao fato de não buscar colher as áreas nos melhores momentos, as outras premissas do modelo

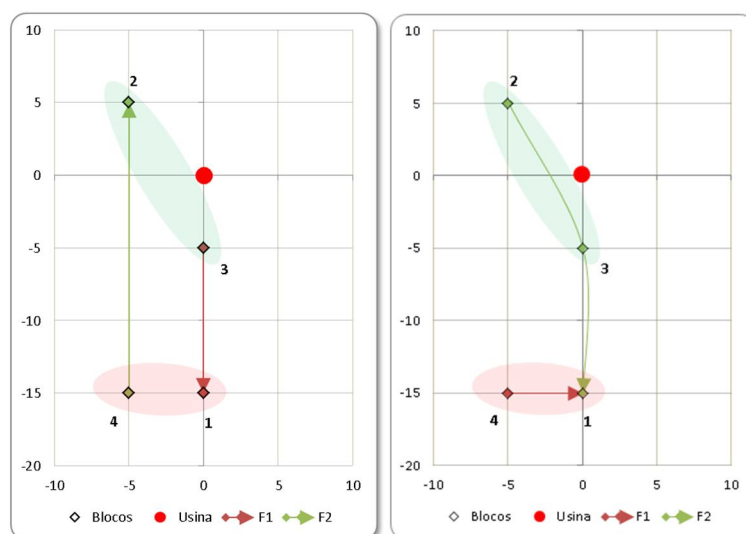
são devidamente atendidas. Assim, pode-se dizer que o Modelo 1A possui limitações se comparado ao Modelo 1, mas atende melhor à situação problema que os outros modelos encontrados na literatura e apresenta uma solução básica, por hipótese, de qualidade superior às soluções geradas pelos *softwares* comerciais, por considerar o deslocamento das frentes de colheita e as capacidades de colheita e transporte, sendo uma boa opção ao Modelo 1 quando este não permite a obtenção de soluções factíveis para o Modelo 1.

4.1.2.2.3 Testes com o Modelo 1B

Assim como o Modelo 1A, o Modelo 1B envolve uma modificação do Modelo 1 para permitir a obtenção de soluções básicas factíveis com menor esforço computacional. No Modelo 1B, o deslocamento das frentes continua penalizando a capacidade de colheita, todavia a restrição de moagem é relaxada de forma a permitir uma solução factível trivial com a produção de todas as frentes zerada. Para que o modelo seja consistente, a perda de moagem e a cana bisada são penalizadas na função objetivo. No caso do Modelo 1B, seção 4.1.1.2, foram realizados 11 experimentos. Em dois destes experimentos o Modelo 1B foi comparado com os Modelos 1 e 1A. Além disso, foram analisadas alterações no período disponível para a colheita (Bs_{jt}), no número de colhedoras (Nc_j) e no número de caminhões (Nt).

O experimento 1B.1 é equivalente a 1.4, 1.4' e 1A.1 e 1B.2, equivalente a 1.5, 1.5' e 1A.2. Eles têm como objetivo comparar o Modelo 1B com os Modelos 1, 1', e 1A. O Gráfico 7 (a) e (b) mostra o movimento das frentes de colheita destes dois experimentos.

Gráfico 7: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.1, (b) Exp. 1B.2



A Tabela 17 compara os resultados apresentados nas seções 4.1.1.1 e 4.1.1.2 baseados nos experimentos 1.4 e 1.5 utilizando-se as variantes do Modelo 1 propostas nesta tese.

Tabela 17: Comparação de resultados dos modelos propostos

Variantes do Modelo	Experimentos 1.4, 1.4', 1A.1 e 1B.1			Experimentos 1.5, 1.5', 1A.2 e 1B.2		
	Produção (t)	fo do Modelo 1	Nota	Produção (t)	fo do Modelo 1	Nota
1	66.375	283.375	4,27	68.000	323.000	4,75
1'	66.375	283.375	4,27	68.000	323.000	4,75
1A	63.000	267.750	4,25	63.000	298.462	4,74
1B	66.375	281.250	4,24	68.000	321.750	4,73

Diferentemente do experimento 1A.1 e similar aos resultados dos experimentos 1.4 e 1.4', o experimento 1B.1 buscou colher o que os recursos de colheita e transporte permitiram, pois a cana bisada é penalizada na função objetivo. Com isso, o valor total apresentado para a função objetivo do Modelo 1 é significativamente maior que em 1A.1 e ligeiramente menor que 1.4 e 1.4', contudo, a nota média ponderada de 1B.1 é ligeiramente menor que os experimentos dos demais modelos. Comportamento similar pode ser observado no experimento 1B.2, ressaltando-se que neste caso foi possível colher o máximo de matéria-prima disponível, já que os recursos de colheita não foram limitantes.

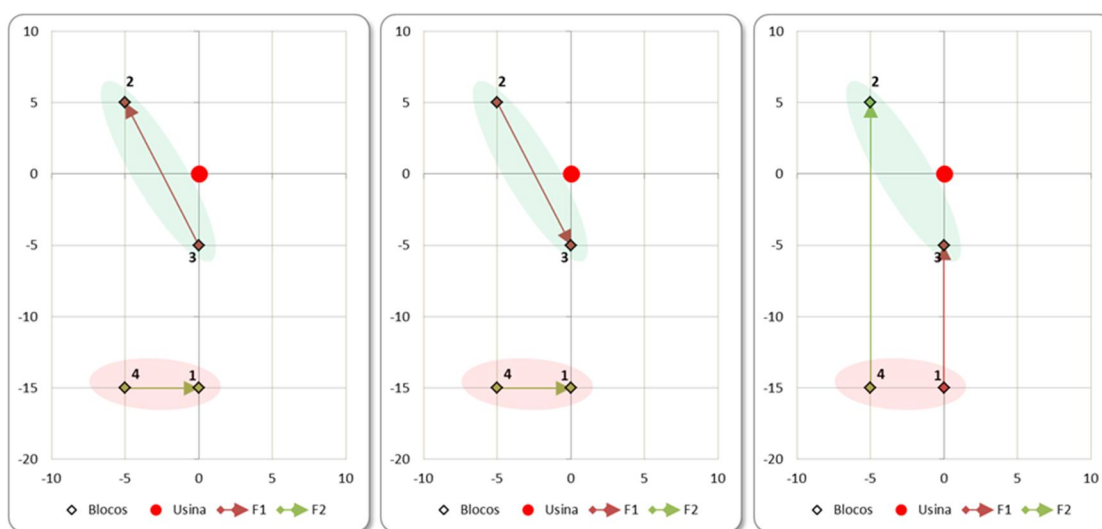
Nos experimentos 1B.3 a 1B.5, foram alterados os recursos para 10 colhedoras e nove caminhões e modificados os períodos disponíveis para a colheita. No experimento 1B.3 manteve-se a condição da Tabela 13. Já no Experimento 1B.4, considerou-se que o bloco 2 pode ser colhido no primeiro período, mas não no segundo, o contrário da condição anterior. Já no Experimento 1B.5, o bloco 2 pode ser colhido em qualquer período, mas o bloco 1 não pode ser colhido no segundo período.

Espera-se que quando houver mudança no período permitido de colheita, dois efeitos sejam possíveis: a mudança não é significativa para a programação da frente ou alterar a sequência de colheita aumentando o deslocamento da frente. No experimento 1B.3 as janelas de tempo permitem que as frentes possam ser divididas nas duas regiões distintas: uma próxima à usina com blocos próximos entre si e com bons potenciais de colheita, e outra nos blocos mais distantes com menor potencial de colheita, mas próximos entre si. Esta é uma condição equilibrada em termos de capacidade de colheita e transporte, demandando pequeno deslocamento das frentes de colheita. No experimento 1B.4 espera-se que a alteração nas

janelas de tempo induza apenas a uma inversão de sentido na sequência de colheita em uma das frentes, sem alterar significativamente a condição do experimento 1B.3.

O Gráfico 8 mostra o movimento das duas frentes nos três experimentos. Conforme previsto, percebe-se que no primeiro experimento, F1 ficou próxima à usina e nas áreas de maior potencial de colheita, e F2 ficou na área mais distante, com menor potencial de colheita. Nos dois períodos, ambas as frentes mantiveram equilibradas as capacidades de colheita e transporte.

Gráfico 8: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.3, (b) Exp. 1B.4, (c) Exp. 1B.5



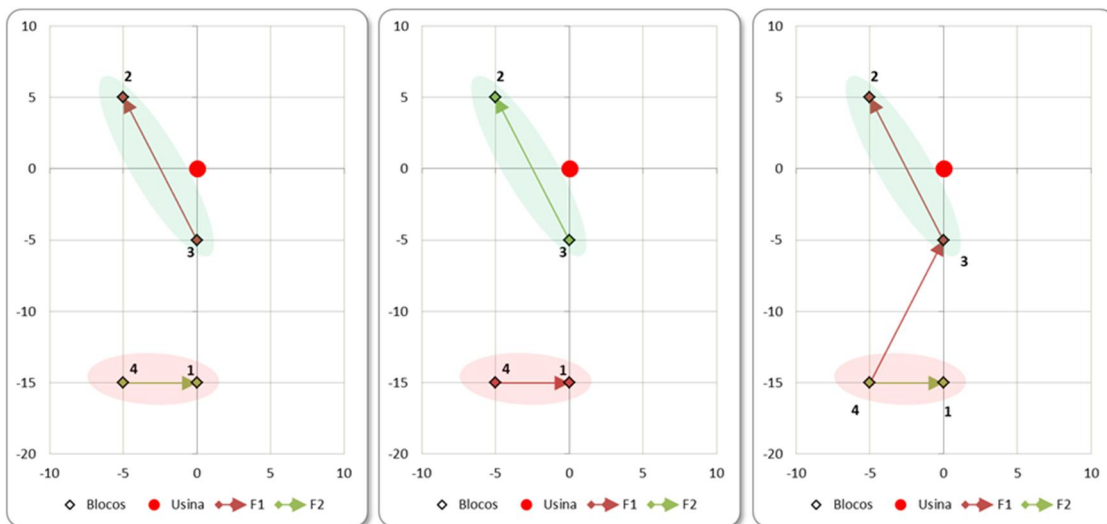
No experimento 1B.4, também dentro do que se esperava, houve apenas uma inversão na sequência F1 para atender a modificação dos períodos disponíveis para colheita, todavia colheu os mesmos blocos (2 e 3). Nos dois casos o valor da função objetivo foi o mesmo (R\$46,20), uma vez que não houve falha no suprimento e o deslocamento das frentes foi o mesmo. Neste caso, o valor da função objetivo foi relativamente baixo, pois a parcela que influenciou foi o deslocamento da frente de colheita, que, conforme discutido anteriormente, está presente no modelo apenas como um critério de desempate.

Já no experimento 1B.5, a mudança nos períodos de colheita provocou um aumento da distância percorrida das frentes. As frentes ficaram no período 1 nas áreas com menor potencial de colheita e mais distantes e, depois, foram para as áreas mais próximas e com maior potencial de colheita. Embora não tenha havido equilíbrio das capacidades nos períodos, o excesso de recursos de colheita e transporte não comprometeu o suprimento mínimo de matéria-prima à usina. Observa-se que o superdimensionamento de recursos pode ser uma forma de lidar com planos de colheita que não objetivam o balanceamento dos

recursos no sequenciamento de frentes. Embora tenha um comportamento diferente dos outros dois experimentos, o resultado continua estando dentro do esperado.

O Gráfico 9 mostra a alteração do movimento das frentes conforme as colhedoras vão sendo retiradas de operação, mantendo-se as mesmas disponibilidades temporais dos blocos. Espera-se que com a retirada das colhedoras disponíveis para a operação, a frente busque explorar melhor seu potencial de colheita para evitar a falta de matéria-prima, mesmo que para isso seja necessário aumentar o deslocamento da frente. Caso haja uma redução de maquinário e, mesmo assim, os recursos sejam suficientes para atender à demanda, esta redução representa um ganho de competitividade da operação. Este ajuste fino de capacidade é uma das respostas esperadas do modelo.

Gráfico 9: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.3, (b) Exp. 1B.6, (c) Exp. 1B.7

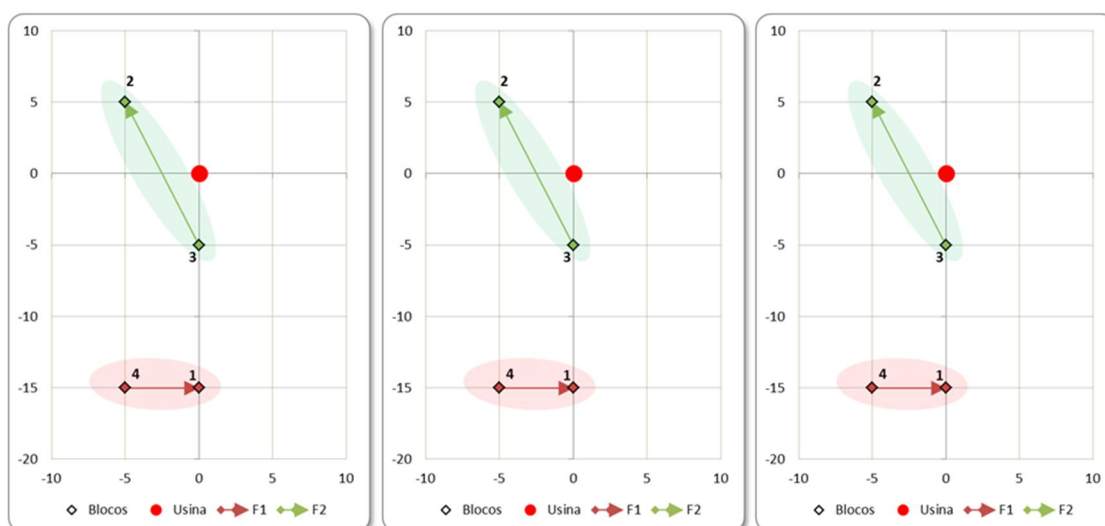


No experimento 1B.6 estão disponíveis nove e no 1B.7, oito colhedoras. Observa-se o mesmo movimento das frentes nos experimentos 1B.3 e 1B.6. No entanto, no experimento 1B.6, não houve falha de suprimento e o custo de deslocamento foi menor (R\$90,00), pois havia uma colhedora a menos para ser transportada. Ou seja, no experimento 1B.3 havia uma colhedora em excesso, equivalente a R\$30.404,64 (2sem*168h*R\$90,49/h). Já no experimento 1B.7 houve falha no suprimento de 3.576 toneladas, o que fez com que o custo de deslocamento da frente e perda de moagem fosse para R\$514.944,00. Neste caso, para conseguir produzir um pouco mais, F1 colheu o bloco 4 no mesmo período em que F2 estava por lá. F1 pode fazer isso, pois teve capacidade para colher parte do bloco 4 e toda matéria-prima dos blocos 2 e 3, já que estes últimos dois blocos tinham bom potencial de colheita. O pouco que F2 colheu do bloco 4 compensou o deslocamento adicional. Neste

exemplo, entretanto, percebe-se que o custo de perda de moagem devido à falta de uma colhedora é mais que dezesseis vezes o de uma colhedora sobrando.

O Gráfico 10 mostra a alteração do movimento das frentes conforme vão sendo retirados caminhões de operação, mantendo-se as mesmas disponibilidades temporais dos blocos e baseado no experimento 1B.6, que apresentou o dimensionamento mais adequado de colhedoras. Similarmente ao caso das colhedoras, espera-se que com a retirada dos caminhões disponíveis para a operação, a frente busque explorar melhor seu potencial de transporte para evitar a falta de matéria-prima, mesmo que para isso seja necessário aumentar o deslocamento da frente. No experimento 1B.8 são oito e no 1B.9, sete caminhões. Observa-se o mesmo movimento das frentes nos experimentos 1B.6 e 1B.8. No entanto, no experimento 1B.8, não houve falha de suprimento com um caminhão a menos. Ou seja, no experimento 1B.6 havia um caminhão em excesso, equivalente a R\$20.650,56 ($2\text{sem} \times 168\text{h} \times \text{R}\$61,46/\text{h}$). Já no experimento 1B.9, houve falha no suprimento de 2.550 toneladas, o que fez com que o custo de deslocamento da frente e perda de moagem fosse para R\$367.200,00. Neste caso, a falha no transporte não interferiu na capacidade de produção das frentes, todavia elevou a taxa de colheita das frentes com maior capacidade de transporte (no caso as mais próximas).

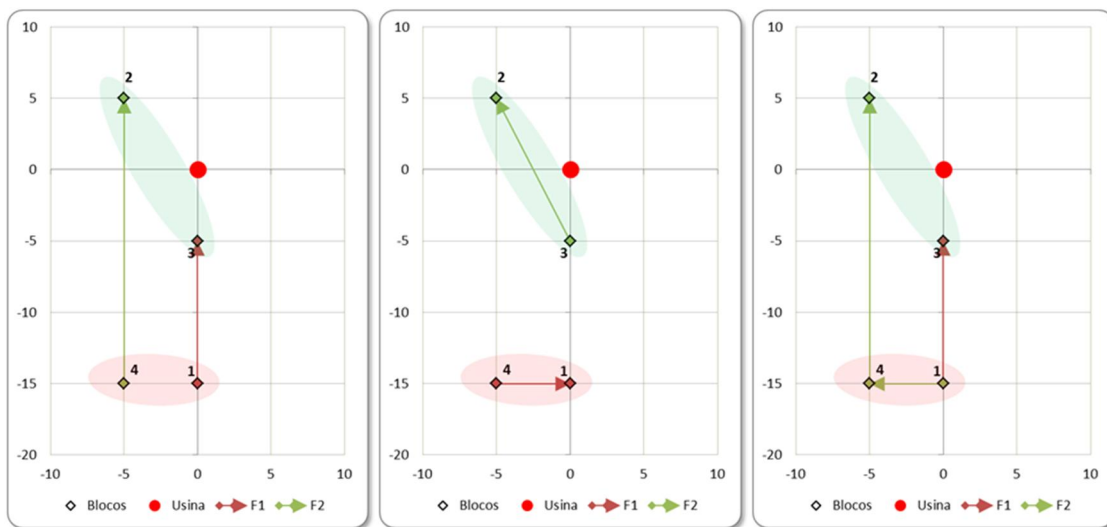
Gráfico 10: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.6, (b) Exp. 1B.8, (c) Exp. 1B.9



O Gráfico 11 mostra a alteração do movimento das frentes com base nos períodos de colheita do Experimento 1B.5, mas retirando uma colhedora no Experimento 8 e um caminhão no Experimento 1B.11. Nos dois casos, há falta de moagem, ou seja, o manejo das áreas conforme o Experimento 1B.5 impõe um custo adicional de R\$51.055,20. Este custo pode ser mitigado se o plantio das novas áreas estiver integrado na programação das

frentes de colheita, que leva em consideração o equilíbrio das capacidades produtivas dos recursos de colheita e transporte. Era esperado que no caso do Experimento 1B.5, a folga de recursos fosse menor quando comparado ao Experimento 1B.3, o que de fato foi comprovado pelos experimentos. No Experimento 1B.5 não havia folga, já no 1 havia de uma colhedora e um caminhão.

Gráfico 11: Movimento das frentes: (a) Exp. 1B.5, (b) Exp. 1B.10, (c) Exp. 1B.11



Como o Modelo 1B permite trabalhar com cenários que seriam infactíveis nos Modelos 1 e 1A, nesta seção foi possível analisar o acréscimo de custo proveniente do superdimensionamento dos recursos de colheita e transporte, comparando-o com o custo referente à perda de moagem. Embora o Modelo 1B não busque a colheita da área no melhor período da janela de tempo, já que não se trata de um parâmetro mandatório, representa as demais premissas do modelo conceitual.

4.1.3 Considerações sobre os modelos propostos

Na seção 4.1.1, foi desenvolvido um modelo matemático para resolver a situação problema descrita na seção 2.7. O Modelo 1 aborda todos os aspectos relevantes para esta tese. Duas outras variações deste modelo foram propostas para que a obtenção de uma solução factível exija menor esforço computacional, já que se trata de um modelo de grande porte. O Modelo 1A utiliza uma simplificação das restrições de capacidade de colheita que, de acordo com a literatura, retirando-se a perda de tempo com *setup*, no caso a restrição de deslocamento da frente, reduz-se a complexidade do problema. Já o Modelo 1B busca obter

uma solução factível trivial por meio da inserção de uma variável de folga na restrição de moagem, penalizando a moagem perdida na função objetivo.

Já na seção 4.1.2 foi montada uma instância de teste com dados realistas para o problema, mas com o mínimo porte possível. Vários experimentos foram feitos para analisar o comportamento do Modelo 1 e suas variantes frente a alterações na janela de tempo, no tipo de colheita, bem como no número de recursos de colheita e transporte. Em todos os experimentos, os modelos comportaram-se como esperado e foram comparados entre si na Tabela 17. Conforme mostra esta tabela, nas variações do Modelo 1, observou-se perda na busca pela colheita no melhor macroperíodo dentro de uma janela de tempo, todavia a variação da nota média ponderada não é significativa. Além disso, a busca do melhor momento de colheita trata-se de uma característica desejável, mas não mandatária para o modelo científico, já que são obedecidas as janelas de tempo. Na seção 4.1.2.2.3, com base no Modelo 1B, também foi analisado o impacto econômico de se trabalhar superdimensionado e/ou perder moagem. Esta análise mostrou que nos cenários em que houve perda de moagem, seu impacto mostrou-se superior aos com excesso de recursos, todavia observaram-se custos da ordem de R\$30 mil em duas semanas quando há uma colhedora sobrando e de R\$20 mil quando há um caminhão em excesso. Ou seja, se o suprimento de matéria-prima estiver garantido, a redução da ociosidade dos recursos de colheita e transporte implicará em significativas diminuições de custos. Também foi demonstrado que é possível economizar caminhões e colhedoras se as janelas de tempo das áreas são mescladas de forma a manter um potencial de colheita e transporte médio durante os períodos de colheita.

Assim, os modelos propostos representam o comportamento esperado e apesar das limitações dos Modelos 1A e 1B em relação ao Modelo 1, eles representam com pouca perda de realismo a situação problema e suas características possibilitam estratégias de resolução alternativas para viabilizar a solução do problema. Além disso, verificou-se a relevância econômica de reduzir excesso de recursos e buscar janelas de tempo que permitam operar com uma quantidade mínima de recursos. Cabe ressaltar que esta intervenção nas janelas de tempo é possível principalmente através da análise do equilíbrio da colheita e do transporte no momento do planejamento de plantio, conforme abordado no modelo conceitual do problema estudado nesta tese, seção 2.7.

4.2 Métodos de solução propostos

A resolução exata de um problema real com base nos modelos propostos na seção anterior pode não ser viável devido ao porte esperado para este tipo de problema na prática. Para ilustrar o tamanho do problema tratado, considerou-se uma instância de dados com um caso típico de uma usina de médio porte, similar à Empresa A, que será apresentada na seção 5.1, com cinco frentes de colheita, oito meses de safra (macroperíodos), com 200 dias efetivos de safra e um tempo de permanência médio de três dias da frente por bloco. Portanto, 80 microperíodos e 330 blocos de colheita, resultariam em $5 \cdot 80 \cdot 330 = 132.000$ variáveis inteiras. Com este porte do problema, foram investigados métodos heurísticos para a sua resolução em situações práticas.

A primeira etapa do método proposto foi de agregação dos blocos de colheita, de tal forma que não se descaracterize variáveis como a distância do bloco em relação à usina e o potencial de colheita. A segunda etapa envolve proposição de métodos heurísticos baseados em *solvers* de programação matemática, como *relax-and-fix*, para construir uma boa solução inicial factível. A terceira etapa envolve a utilização do método *fix-and-optimize* para buscar a melhoria da solução inicial da etapa 2. A Figura 12 ilustra o método heurístico proposto para resolver os modelos 1, 1A e 1B com porte real.

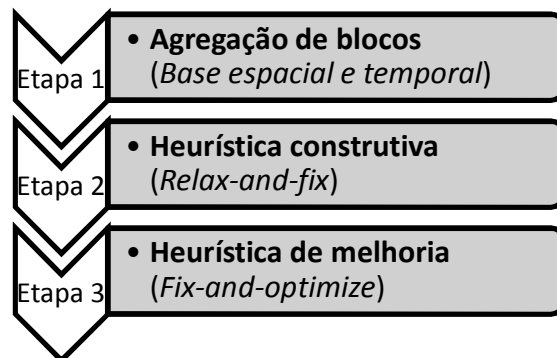


Figura 12: Método heurístico proposto

Uma simples heurística alternativa seria resolver o problema original no pacote de otimização com um tempo máximo limitado, mesmo sem chegar à solução ótima. Para este tipo de heurística pode também ser adequado utilizar a agregação de blocos (etapa 1).

4.2.1 Agregação de blocos

Usualmente, os blocos de colheita considerados nas usinas não ultrapassam em termos espaciais os limites da fazenda, porém se são conhecidas as coordenadas geográficas

do bloco j' ($X_{j'}, Y_{j'}$), é possível extrapolar estes limites e tratar uma região geográfica mais ampla. Sugere-se então que o mapa operacional da usina seja dividido em quadrículas Q de 10 quilômetros (*i.e.* 100 quilômetros quadrados), por exemplo. Assim, a quadrícula q é definida pelo conjunto de coordenadas $\{(X_{qmin}, Y_{qmin}), (X_{qmin}, Y_{qmax}), (X_{qmax}, Y_{qmin}), (X_{qmax}, Y_{qmax})\}$, dado que o ponto (X_{qmin}, Y_{qmin}) representa a coordenada mínima da quadrícula q e o ponto (X_{qmax}, Y_{qmax}) representa a coordenada máxima. Para que o bloco j' pertença à quadrícula q , as seguintes condições devem ser satisfeitas: $X_{qmin} \leq X_{j'} < X_{qmax}$ e $Y_{qmin} \leq Y_{j'} < Y_{qmax}$. Assim, o conjunto BE_q agrupa os blocos j' pertencentes à quadrícula q .

O bloco agregado, entretanto, não pode desprezar as janelas de tempo de cada bloco de colheita, que são representadas por $BS_{j't}$ nos modelos propostos. Estas janelas também podem ser caracterizadas por permitir (1) ou não (0) a colheita em determinado mês (macroperíodo). Se a safra for dividida em oito macroperíodos, por exemplo, cada bloco poderia ter um padrão temporal do tipo $|0|0|0|1|1|1|0|0|$. Este código representa que o bloco não pode ser colhido nem nos três primeiros macroperíodos, nem nos dois últimos. A colheita é permitida do quarto ao sexto macroperíodo. Outro exemplo, se uma área pode ser colhida nos primeiros três meses da safra (de oito meses), teria o padrão $|1|1|1|0|0|0|0|0|$, já outra que pode ser colhida nos últimos quatro meses, teria o padrão $|0|0|0|0|1|1|1|1|$. Assim, pode haver P padrões temporais, cada um deles caracterizado por permitir (1) ou não (0) a colheita em determinado macroperíodo t (PT_{pt}). Dessa forma, BT_p representa o conjunto dos blocos j' pertencentes ao padrão temporal p em que $BS_{j't}=PT_{pt}$.

O bloco agregado j , então, é formado pelo conjunto de blocos j' em que $X_{qmin} \leq X_{j'} < X_{qmax}$, $Y_{qmin} \leq Y_{j'} < Y_{qmax}$ e $BS_{j't}=PT_{pt}$, ou seja, $BA_j = BA_{qp} = BE_q \cap BT_p$ vide Figura 13. Por exemplo, para $j' = 1, \dots, 10$, $q = \alpha, \beta$ e $p = A, B$, tem-se $BE_\alpha = \{1,3,7,9\}$, $BE_\beta = \{2,4,5,6,8,10\}$, $BT_A = \{2,4,7,8,9,10\}$, $BT_B = \{1,3,5,6\}$. Com isso, são formados quatro blocos, $j = 1,2,3,4$, ou seja, $BA_1 = BE_\alpha \cap BT_A = \{7,9\}$, $BA_2 = BE_\alpha \cap BT_B = \{1,3\}$, $BA_3 = BE_\beta \cap BT_A = \{2,4,8,10\}$, $BA_4 = BE_\beta \cap BT_B = \{5,6\}$.

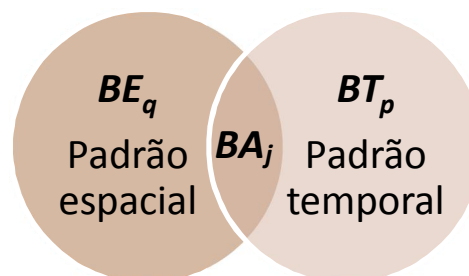


Figura 13: Definição do bloco agregado

Uma vez formado o bloco agregado, é necessário determinar suas características agregadas baseadas na unidade de área j' , que seriam: a produção, o potencial de colheita, de transporte e as coordenadas geográficas. A produção do bloco agregado seria a soma de $p_{j'}$, bem como $col_{mj'}$, $transp_{mj'}$, $X_{j'}$ e $Y_{j'}$ são determinados por meio da média ponderada pela produção, como mostram as equações (104) a (108).

$$p_j = \sum_{j' \in BA_j} p_{j'} \quad (104)$$

$$col_{mj} = \frac{\sum_{m=man}^{mec} \sum_{j' \in BA_j} col_{mj'} * p_{j'}}{\sum_{j' \in BA_j} p_{j'}} \quad (105)$$

$$transp_{mj} = \frac{\sum_{m=man}^{mec} \sum_{j' \in BA_j} transp_{mj'} * p_{j'}}{\sum_{j' \in BA_j} p_{j'}} \quad (106)$$

$$X_j = \frac{\sum_{j' \in BA_j} X_{j'} * p_{j'}}{\sum_{j' \in BA_j} p_{j'}} \quad (107)$$

$$Y_j = \frac{\sum_{j' \in BA_j} Y_{j'} * p_{j'}}{\sum_{j' \in BA_j} p_{j'}} \quad (108)$$

Na instância de dados apresentada no início desta seção, foi possível reduzir o número de blocos de 330 para 93. Com isso o número de variáveis inteiras passa a ser $5*80*93 = 37.200$, ao invés de 132.000 no problema original. Ou seja, isso equivale a uma redução substancial de aproximadamente 70% de número de variáveis inteiras do problema, além do impacto na redução no número de restrições. Entretanto, deve-se ter cuidado ao definir o tamanho da quadrícula, pois, de um lado quanto maior seu tamanho, maior a redução do número de variáveis do problema, mas de outro, quadrículas muito grandes podem encobrir o efeito da mudança de área. Neste sentido, é fundamental que o planejador que conheça as áreas da usina possa auxiliar na determinação dos blocos agregados de colheita.

4.2.2 Heurística de construção

Conforme abordado nas seções 3.3.2.2.2 e 3.3.2.2.3, heurísticas que utilizam *solvers* de programação matemática vem tendo bons resultados na literatura, como *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. Como a heurística *relax-and-fix* possibilita a geração de uma solução inicial factível (heurística construtiva), sua execução sucede a formação dos blocos agregados. A literatura mostra várias estratégias de decomposição das variáveis de decisão para o método *relax-and-fix* para a resolução do GLSPPL, dentre elas as que utilizam o período (macroperíodos) e os recursos (frentes de colheita). Também é possível uma composição das duas. Ao utilizar uma estratégia *relax-and-fix* com base no período, pode-se pensar em duas formas: *forward*, do primeiro ao último período, ou *backward*, do último ao primeiro.

Seja tt um índice auxiliar idêntico a t , que representa os macroperíodos. Assim, a Figura 14 mostra um algoritmo *relax-and-fix* proposto para a resolução dos modelos de programação matemática propostos na seção 4.1.1, com uma estratégia de decomposição da variável y_{ljs} temporal *forward* e a Figura 15, o mesmo tipo de algoritmo, com uma estratégia temporal *backward*. Nestes dois casos foi possível reduzir o número de microperíodos dentro de cada subproblema. No exemplo tratado na seção 4.2.1, os 80 microperíodos são reduzidos para 10 em cada subproblema. Com isso, a quantidade de variáveis inteiras passa a ser $5 \cdot 10 \cdot 93 = 4.650$, aproximadamente 88% (37.200 variáveis) menor do que o problema com blocos agregados e 97% menor do que o problema original (137.000 variáveis). Apesar de ser necessário resolver o subproblema oito vezes, este porte para o GLSPPL é significativamente mais tratável computacionalmente.

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});
 Para $tt = 1$ até T , faça:
 Tratar as variáveis y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;
 Fixar valores de $y_{ljs} \in Bl_{jl}$, $y_{ljs} \in Bs_{jtt}$ e $y_{ljs} \in S_{tt}$;
 Resolver o GLSPPL;
 Fixar os valores obtidos de y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$);

Figura 14: Algoritmo *relax-and-fix* temporal *forward*

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});
 Para $tt = T$ até 1, faça:
 Tratar as variáveis y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;
 Fixar valores de $y_{ljs} \in Bl_{jl}$, $y_{ljs} \in Bs_{jtt}$ e $y_{ljs} \in S_{tt}$;
 Resolver o GLSPPL;
 Fixar os valores obtidos de y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$);

Figura 15: Algoritmo *relax-and-fix* temporal *backward*

Seja ll um índice auxiliar idêntico a l , que representa as frentes de colheita (recursos). Assim, a Figura 16 mostra um algoritmo *relax-and-fix* proposto para a resolução dos modelos de programação matemática propostos na seção 4.1.1, com uma estratégia de

decomposição da variável y_{ljs} por frente de colheita. Neste caso foi possível reduzir o número de frentes dentro de cada subproblema. No exemplo tratado na seção 4.2.1, as cinco frentes são reduzidas para uma em cada subproblema. Com isso, a quantidade de variáveis inteiras passa a ser $1*80*93 = 7.440$, aproximadamente 67% (37.200 variáveis) menor do que o problema com blocos agregados e 95% menor do que o problema original (137.000 variáveis). Apesar de ser necessário resolver o subproblema cinco vezes, este porte para o GLSPPL também é significativamente mais tratável computacionalmente. Comparando com a estratégia anterior, o porte do subproblema para a partição temporal é menor, mas a partição por frentes permite que o problema seja resolvido um menor número de vezes.

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});
 Para $l = 1$ até F , faça:
 Tratar as variáveis y da frente l (y_{ljs}) como inteiras;
 Fixar valores de $y_{ljs} \in Bl_{jl}$ e $y_{ljs} \in Bs_{jt}$;
 Resolver o GLSPPL;
 Fixar os valores obtidos de y da frente l (y_{ljs});

Figura 16: Algoritmo *relax-and-fix* por frente de colheita

Já a Figura 17 mostra uma estratégia mista de decomposição do período e depois da frente de colheita. Neste caso foi possível reduzir o número de frentes dentro de cada subproblema, bem como os microperíodos. No exemplo tratado na seção 4.2.1, as cinco frentes são reduzidas para uma em cada subproblema e os microperíodos passam a ser 10. Com isso, a quantidade de variáveis inteiras passa a ser $1*10*93 = 930$, aproximadamente 98% (37.200 variáveis) menor do que o problema com blocos agregados e 99% menor do que o problema original (137.000 variáveis). Apesar do subproblema ser relativamente pequeno, ele deve ser resolvido 40 vezes.

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});

Para $tt = 1$ até T , faça:

 Para $ll = 1$ até F , faça:

 Tratar as variáveis y do período tt e frente ll como inteiras ($y_{lljs} \in S_{tt}$);

 Fixar valores de $y_{lljs} \in Bl_{jll}$, $y_{lljs} \in Bs_{jtt}$ e $y_{lljs} \in S_{tt}$;

 Resolver o GLSPPL;

 Fixar os valores obtidos de y do período tt e frente ll ($y_{lljs} \in S_{tt}$);

Figura 17: Algoritmo *relax-and-fix* temporal e por frente de colheita

Outra estratégia mista de partição das variáveis inteiras por período é o *relax-and-fix forward e backward* sucessivos. A Figura 18 mostra o algoritmo desta heurística, em que os subproblemas relacionados às bordas são tratados anteriormente ao meio. Supõe-se que haja maior complexidade na resolução dos problemas nas extremidades. O porte dos subproblemas é idêntico à versão *forward* ou *backward* anteriormente apresentadas.

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});

Para $tt = 1$ até $T/2$, faça:

 Tratar as variáveis y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;

 Fixar valores de $y_{ljs} \in Bl_{jl}$, $y_{ljs} \in Bs_{jtt}$ e $y_{ljs} \in S_{tt}$;

 Resolver o GLSPPL;

 Fixar os valores obtidos de y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$);

 Tratar as variáveis y do período $T-tt+1$ ($y_{ljs} \in S_{T-tt+1}$) como inteiras;

 Fixar valores de $y_{ljs} \in Bl_{jl}$, $y_{ljs} \in Bs_{jtt}$ e $y_{ljs} \in S_{tt}$;

 Resolver o GLSPPL;

 Fixar os valores obtidos de y do período $T-tt+1$ ($y_{ljs} \in S_{T-tt+1}$);

Figura 18: Algoritmo *relax-and-fix* temporal *forward e backward*

Outra técnica utilizada neste trabalho foi a sobreposição de tempo, *overlapping*. Na estratégia *forward*, por exemplo, em cada macroperíodo o subproblema é resolvido para variáveis inteiras nos períodos tt e $tt-1$. Depois de resolvido o subproblema, as variáveis inteiras relativas ao macroperíodo $tt-1$ são fixadas. Com isso, cada macroperíodo tem a possibilidade de interagir com seu antecessor e sucessor. A Figura 19 mostra o algoritmo para o *relax-and-fix forward* com *overlapping*. Procedimento análogo pode ser aplicado para as estratégias temporal *backward*, bem como *overlapping* com as frentes de colheita. Neste caso, o porte do subproblema possui o dobro do tamanho quando há a partição temporal da variável inteira. No exemplo tratado, o subproblema teria 9.300 variáveis e deveria ser resolvido sete vezes.

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});
 Tratar as variáveis y do período $tt = 1$ ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;
 Para $tt = 2$ até T , faça:
 Tratar as variáveis y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;
 Fixar valores de $y_{ljs} \in B_{ljl}$, $y_{ljs} \in B_{s_jtt}$ e $y_{ljs} \in S_{tt}$;
 Resolver o GLSPPL;
 Fixar os valores obtidos de y do período $tt - 1$ ($y_{ljs} \in S_{tt-1}$);

Figura 19: Algoritmo *relax-and-fix* temporal *forward* com *overlapping*

Outra estratégia abordada foi a partição da variável y_{ljs} com base no bloco, utilizando-se o índice jj , vide Figura 20. Com a estratégia de sobreposição, é possível agrupar um conjunto de blocos para criar um subproblema. No exemplo tratado na seção 4.2.1, os 93 blocos foram divididos em vários subconjuntos e tratados em cada subproblema. Assim, B' representa o número de elementos do subconjunto formado e para o caso de $B' = 5$, por exemplo, a quantidade de variáveis inteiras passa a ser $5 \cdot 80 \cdot 5 = 2.000$, aproximadamente 95% (37.200 variáveis) menor do que o problema com blocos agregados e 98% menor do que o problema original (137.000 variáveis). Com isso, o subproblema torna-se tratável computacionalmente e deve ser resolvido 88 vezes.

Relaxação das variáveis inteiras (y_{ljs});

Para $jj = 1$ até $B'-1$, faça:

Tratar as variáveis y do bloco jj (y_{ljj}) como inteiras;

Para $jj = B'$ até B , faça:

Tratar as variáveis y do bloco jj (y_{ljj}) como inteiras;

Fixar valores de $y_{ljj} \in Bl_{jjl}$ e $y_{ljj} \in Bs_{jjt}$;

Resolver o GLSPPL;

Fixar os valores obtidos de y do bloco $jj - B'+1$ (y_{ljj});

Figura 20: Algoritmo *relax-and-fix* blocos *forward* com *overlapping*

4.2.3 Heurística de melhoria

Após a execução do método *relax-and-fix*, espera-se que seja encontrada uma boa solução inicial factível. Para possibilitar sua melhoria, propõe-se a utilização do método *fix-and-optimize*. Assim como no *relax-and-fix*, o *fix-and-optimize* para resolver o GLSPPL utiliza uma decomposição da variável y_{ljs} com base nas estratégias descritas anteriormente: temporal, por frente (recurso) ou por bloco (produto). Em especial no *fix-and-optimize*, as técnicas de *overlapping* são interessantes, pois as variáveis que não forem inteiras e fizerem parte do subproblema estarão com valores fixos. Com a sobreposição, é possível procurar por soluções diferentes das que foram obtidas na heurística construtiva. A Figura 21 mostra um algoritmo para o método de melhoria *fix-and-optimize* temporal *forward* com *overlapping* de dois períodos. No exemplo tratado na seção 4.2.1, o porte deste subproblema seria semelhante ao caso do *relax-and-fix* com partição temporal das variáveis inteiras e *overlapping*, ou seja, teria 9.300 variáveis e deveria ser resolvido sete vezes.

Da combinação da heurística construtiva com a de melhoria, é possível configurar parâmetros do pacote de otimização diferenciados. Assim, é possível definir, por exemplo, % de *Gap* (vide seção 3.3.2.1) maior para a heurística construtiva, a fim de obter uma solução factível com maior velocidade. Depois o *Gap* pode ser reduzido para a heurística de melhoria para a obtenção de uma solução de melhor qualidade.

Fixar as variáveis inteiras de uma solução inicial factível (y_{ljs});
 Tratar as variáveis y do período $tt = 1$ ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;
 Para $tt = 2$ até T , faça:
 Tratar as variáveis y do período tt ($y_{ljs} \in S_{tt}$) como inteiras;
 Fixar valores de $y_{ljs} \in Bl_{jt}$, $y_{ljs} \in Bs_{jtt}$ e $y_{ljs} \in S_{tt}$;
 Resolver o GLSPPL;
 Fixar os valores obtidos de y do período $tt-1$ ($y_{ljs} \in S_{tt-1}$);

Figura 21: Algoritmo *fix-and-optimize* temporal *forward* com *overlapping*

4.2.4 Considerações sobre os métodos de solução propostos

Conforme comentado anteriormente, a solução ótima do GLSPPL apresentada na seção 4.1.1 pode não ser obtida com tempos computacionais esperados e capacidades de processamento disponíveis em situações típicas do cotidiano de uma usina de cana-de-açúcar. Assim, esta seção apresentou uma série de métodos heurísticos que podem ser combinados para a resolução deste problema. A agregação dos blocos de colheita é imperativa, reduzindo consideravelmente o porte do problema. Conforme discutido, após esta primeira etapa, dois métodos alternativos são possíveis. O primeiro envolve uma heurística construtiva do tipo *relax-and-fix* com várias estratégias diferentes de partição das variáveis inteiras. O segundo envolve uma heurística de melhoria do tipo *fix-and-optimize*, podendo também ter estratégias alternativas. Estas estratégias podem ser orientadas por macroperíodo (temporal), pela frente de colheita (recurso), pelo bloco ou uma combinação destes mecanismos. Também foram consideradas estratégias de sobreposição (*overlapping*). Os subproblemas gerados a partir da partição das variáveis inteiras se apresentam mais tratáveis computacionalmente que o problema original, apesar de ser necessário resolvê-los mais de uma vez.

Cabe ressaltar que estas heurísticas foram aplicadas em vários dos problemas testes da seção 4.1.2, para testar e verificar sua consistência. Estes experimentos demonstraram que as heurísticas propostas possuem potencial para resolver o problema. No entanto, os detalhes destes experimentos não são apresentados por serem muito óbvios. Estas heurísticas, juntamente com modificações dos parâmetros do pacote computacional, são aplicadas, no capítulo seguinte, em dois estudos de caso em usinas de médio porte do setor sucroenergético.

5 Aplicações dos modelos matemáticos

Este capítulo está focado na aplicação dos modelos matemáticos e métodos de solução propostos no capítulo 4 em duas usinas de cana-de-açúcar. Ambas as empresas estudadas possuem porte médio, mas características diferenciadas em termos de idade de fundação, da estrutura fundiária e mecanização da área. Estas empresas são brevemente apresentadas a seguir e, em ambos os casos, trata-se de um problema de grande porte, sendo necessária a utilização dos métodos heurísticos propostos na seção 4.2. Mesmo após o procedimento de agregação de blocos a Empresa A apresenta 37.200 variáveis inteiras e 3.534.918 restrições, enquanto que a Empresa B possui 79.056 variáveis inteiras e 17.063.303 restrições. Deve-se ressaltar que embora a capacidade de moagem da Empresa B não seja significativamente maior que a da Empresa A, ela possui uma estrutura fundiária com áreas mais dispersas geograficamente e com uma maior variedade de janelas de tempo em áreas próximas entre si, o que justifica seu porte significativamente maior. Devido à utilização de heurísticas, é necessária a análise da qualidade das soluções quando não for obtida a solução ótima.

A seguir, a seção 5.1 apresenta o estudo feito na Empresa A e a seção 5.2 analisa o caso da Empresa B.

5.1 Empresa A

A Usina A está localizada no oeste do Estado de São Paulo, última área de expansão no Estado, e sua fundação aconteceu em menos de 10 anos. Possui para a safra 2013/2014 uma moagem de 10.500 t/dia, 2.100.000 t na safra. Em termos de estrutura fundiária, é formada por grandes fazendas, possibilitando operar com grandes blocos de colheita não muito dispersos geograficamente. A topografia é caracterizada por suaves ondulações, proporcionando elevado nível de mecanização da área. Assim, a colheita é totalmente mecanizada e a estrutura de colheita também é toda própria.

Nesta unidade houve um trabalho de consultoria de aproximadamente três anos com foco na logística de colheita e transporte, porém este trabalho foi descontinuado em função de mudanças no *staff* da empresa. Durante este período, foram obtidas informações criteriosas, previstas para a safra 2013/2014, sobre o potencial de colheita e transporte, capacidade de moagem, quantidade de matéria-prima por área, disponibilidade de tempo dos recursos e quantidade de recursos. Este levantamento foi realizado em meados de 2012.

Os potenciais de colheita e transporte foram obtidos com base em um levantamento dos parâmetros mostrados anteriormente pela equipe de colheita e transporte. A quantidade de matéria-prima foi levantada com base no histórico de produtividade relacionado ao estágio de corte. A disponibilidade de tempo dos recursos foi levantada por meio de discussão com a equipe operacional, com o apoio da equipe Empresa α . A capacidade de moagem foi informada por meio do plano agroindustrial da companhia. A quantidade de recursos foi calculada por meio de simuladores determinísticos baseados nas sugestões de cálculo das seções 2.2.3.1 e 2.2.4.3.

Entretanto, como o trabalho na usina foi descontinuado, para complementar as informações necessárias para o estudo, foram inferidas as coordenadas geográficas dos blocos e o período possível de colheita. Para estimar as coordenadas dos blocos, tomou-se por base as coordenadas da usina e a sua distância da usina às áreas. Para o caso do período de colheita, como as variedades plantadas em cada bloco eram conhecidas, tomou-se por base o período de utilização industrial destas variedades. A seção 5.1.1 mostra o resultado da agregação de blocos, que é o primeiro passo para o tratamento dos dados. A seção 5.1.2 apresenta os dados de entrada para o modelo, agrupados por bloco agregado, e, por fim, a seção 5.1.3, discute os experimentos computacionais realizados e os resultados obtidos com os Modelos 1, 1A e 1B. A seção 5.1.4 apresenta e discute a melhor solução obtida para a resolução do problema e a seção 5.1.5 analisa quatro cenários distintos para entender o comportamento das soluções do modelo quando há alteração nos dados de entrada.

5.1.1 Agregação de blocos

A Empresa A trabalha com blocos de colheita como unidade de área. Assim, este procedimento de agregação transforma os blocos originais em blocos agregados de colheita. Sem o procedimento de agregação, o problema envolveria 341 blocos, cinco frentes de colheita, oito macroperíodos e 10 microperíodos dentro de cada macroperíodo, resultando em 136.000 variáveis inteiras (y_{ljs}). Assim, primeiramente decidiu-se tornar o problema mais tratável computacionalmente, aplicando as técnicas para agregar os blocos de colheita, conforme discutido adiante. Com isso, foi possível reduzir os 341 blocos originais para 93 blocos agregados, resultando em 37.200 variáveis inteiras e 3.534.918 restrições, ainda assim, um modelo de grande porte. Dessa forma, a resolução deste problema é desafiadora do ponto de vista do processamento computacional.

Para a agregação dos blocos foram levados em conta dois critérios básicos: o macroperíodo e o espaço. No estudo, 10 padrões foram detectados, conforme mostra a Tabela

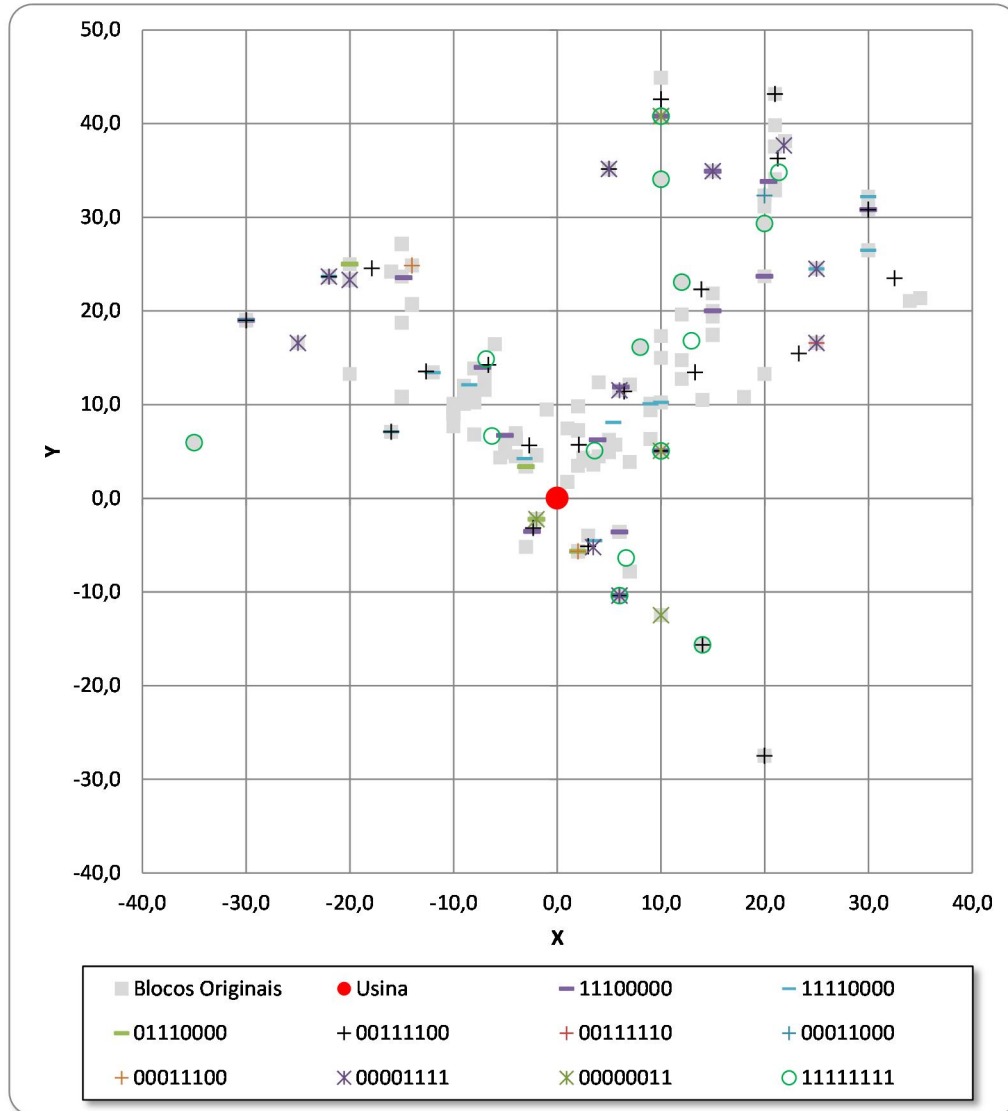
18. O padrão 10 refere-se às áreas ainda a serem plantadas. Os padrões 1 e 2 são de áreas plantadas com variedades tardias. Os padrões 3, 4, 5 e 6 são de áreas plantadas com variedades médias e os padrões 7, 8 e 9 são de áreas plantadas com variedades precoces. Cabe ressaltar que o padrão |1|1|1|1|1|1|1|1| é aquele que possui maior grau de liberdade para encaixar a programação da área em qualquer período, podendo, assim, atuar como fator de equilíbrio das capacidades de colheita e transporte.

Tabela 18: Padrões de período (I A1)

Padrão	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1 0 0 0 0 0 0 1 1	0	0	0	0	0	0	1	1
2 0 0 0 0 1 1 1 1	0	0	0	0	1	1	1	1
3 0 0 0 1 1 0 0 0	0	0	0	1	1	0	0	0
4 0 0 0 1 1 1 0 0	0	0	0	1	1	1	0	0
5 0 0 1 1 1 1 0 0	0	0	1	1	1	1	0	0
6 0 0 1 1 1 1 1 0	0	0	1	1	1	1	1	0
7 0 1 1 1 0 0 0 0	0	1	1	1	0	0	0	0
8 1 1 1 0 0 0 0 0	1	1	1	0	0	0	0	0
9 1 1 1 1 0 0 0 0	1	1	1	1	0	0	0	0
10 1 1 1 1 1 1 1 1	1	1	1	1	1	1	1	1

No caso do espaço, a área operacional da usina foi separada em reticulados de 10 km, resultando em um envoltório de 68 km de largura e 71 km de altura. A agregação foi feita por meio da união dos padrões de período dentro de cada quadrícula. O Gráfico 12 mostra a distribuição geográfica dos blocos de colheita originais e dos agregados. A usina está localizada na coordenada (0,0). Os blocos originais estão em cor cinza. No caso dos blocos agregados, cada tipo de marcador representa um tipo de variedade que pode compreender mais de um padrão temporal (precoce, média, tardia e plantio). As cores dos blocos agregados distinguem os diferentes padrões pertencentes a um mesmo tipo de variedade.

Analisando-se o Gráfico 12, percebe-se que embora haja alguns pontos em que o bloco original coincida com o bloco agregado (quadrícula $X=[-40,-30]$ e $Y=[0,10]$), especialmente próximo à usina, percebe-se que vários blocos foram agrupados em um (quadrícula $X=[-10,0]$ e $Y=[0,10]$). Também nesta última quadrícula, observa-se que há vários padrões de período, contudo eles não se repetem dentro dela. Há alguns outros casos de haver vários padrões dentro de uma mesma quadrícula (por exemplo, $X=[10,20]$ e $Y=[-20,-10]$).

Gráfico 12: Distribuição geográfica dos blocos de colheita (I A1)

Os pontos de atenção que devem ser considerados com este método podem ser vistos nas quadrículas ($X=[-20,-10]$, $Y=[10,20]$ e $X=[-10,0]$, $Y=[10,20]$), em que há dois padrões temporais 11110000 relativamente próximos um do outro. Entretanto, foram considerados dois blocos agregados que apesar de não comprometerem a precisão da agregação, reduzem o poder de sintetização do método. Outro ponto de atenção se refere à quadrícula ($X=[30,40]$ e $Y=[20,30]$) em que o bloco agregado desloca significativamente de seus blocos originais, podendo reduzir a precisão do método em especial se estivéssemos tratando de um horizonte de tempo semanal, por exemplo. Já no caso de um horizonte da safra, contexto deste trabalho, este desvio não compromete a aplicação dos modelos propostos.

5.1.2 Dados de entrada

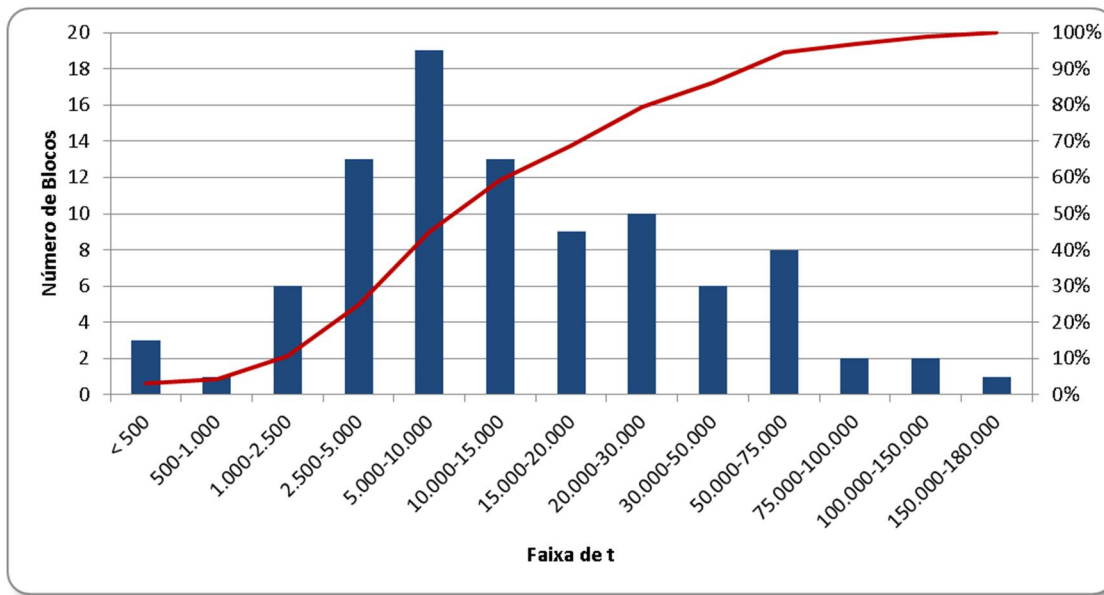
O procedimento de agregação de blocos reduziu consideravelmente a quantidade dos dados de entrada do modelo. Ainda assim, esta quantidade é grande e, por isso, eles foram estruturados em uma tabela de *Excel* 2010. Esta estruturação possibilitou facilitar a alimentação dos dados, já que a implementação computacional realizada em GAMS 24.1.3 permite que os dados de entrada sejam alimentados automaticamente pelo *Excel* 2003. O agrupamento destes dados que pode ser utilizado nos Modelos 1, 1A e 1B é denominado instância A1 (I A1).

O Apêndice C mostra os dados de produção, capacidade de colheita e capacidade de transporte por bloco de colheita da instância A1. Primeiramente, cabe ressaltar que todos os blocos de colheita são mecanizáveis e que a colheita será feita com três frentes de cinco colhedoras e duas frentes com quatro. Descontadas as horas paradas por manutenção, abastecimento, troca de turno, horário de refeição e outras paradas operacionais, as colhedoras devem trabalhar 14 horas por dia segundo a meta adotada pela empresa para a safra. O mesmo vale para as horas trabalhadas dos caminhões que foi definida pela empresa por 16,6 horas trabalhadas como meta.

Para ser mais fácil a visualização das características dos blocos, a Tabela 19 mostra as estatísticas descritivas básicas das características dos blocos agregados. O Gráfico 13 complementa esta caracterização, apresentando um histograma do tamanho dos blocos de colheita. Cabe ressaltar que todos os histogramas deste trabalho contêm um gráfico de barra para cada classe do eixo *x* com a frequência de ocorrência da variável analisada quantificada no eixo *y* principal (neste caso, o número de blocos) e um gráfico de linha representando o percentual acumulado das classes quantificado no eixo *y* secundário. Já o Gráfico 14(a) mostra o histograma do potencial de colheita e o Gráfico 14(b) mostra o potencial de transporte.

Tabela 19: Estatística descritiva das características dos blocos agregados (I A1)

	Tamanho do Bloco (t)	Col. (t/h)	Transp. (t/h)
		mec	mec
Mínimo	267	7	19
Mediana	12.353	31	27
Média	22.492	33	28
Máximo	177.583	60	46

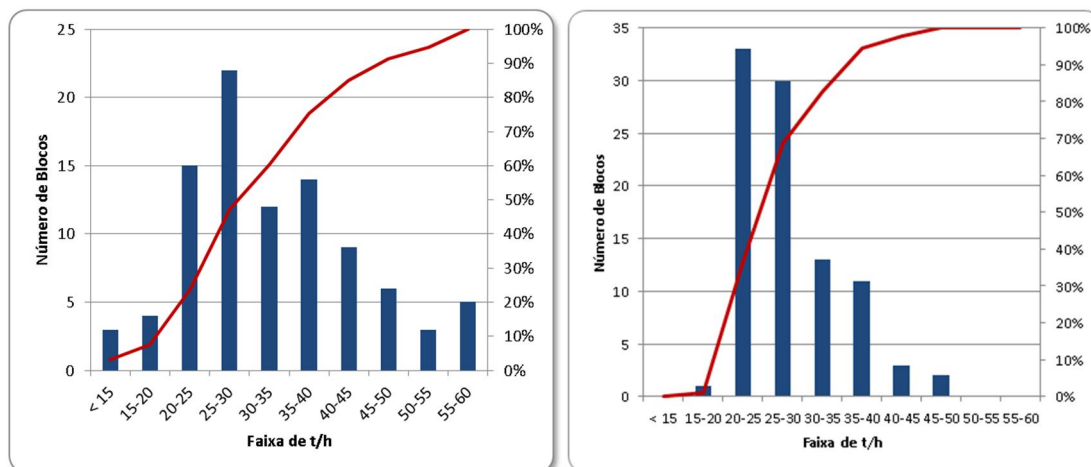
Gráfico 13: Histograma do tamanho do bloco de colheita agregado (I A1)

Analisando o tamanho do bloco na Tabela 19 e no Gráfico 13, percebe-se que embora haja alguns blocos pequenos, ou seja, inferiores a 2.500 toneladas, não são significativos, pois representam aproximadamente 10% dos blocos da usina e menos de 1% da quantidade de matéria-prima disponível. Por outro lado, há grande quantidade de blocos grandes, superiores a 15.000 toneladas, pois representam aproximadamente 30% dos blocos e 82% da matéria-prima disponível. O peso destes blocos grandes desloca a média para um valor de aproximadamente 10.000 toneladas acima da mediana. Esta característica reduz a complexidade para a obtenção de uma solução boa para o problema, pois diminui a necessidade de mudança de área das frentes de colheita, podendo ficar longos períodos em blocos grandes com perdas de capacidade com o deslocamento da frente desprezíveis.

Ao analisar o potencial de colheita na Tabela 19 e no Gráfico 14(a), percebe-se uma dispersão grande, com potenciais muito baixos, variando entre 7 e 60 toneladas por hora. Neste caso, o potencial de colheita baixo pode ser atribuído em especial à seca das safras 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013. Para o caso de uma colhedora trabalhando 14 horas por dia, sua produção varia de 100 a 840 toneladas por dia. Para uma produção de 10.500 toneladas por dia, se todas as colhedoras estiverem em uma condição de produção mínima, são necessárias 105 unidades, todavia, na melhor condição, seriam necessárias apenas 13. Na condição média são necessárias 22,7 colhedoras, sendo que a usina dispõe de 23 no total de suas frentes. As restrições de capacidade de colheita permitem um equilíbrio entre o potencial

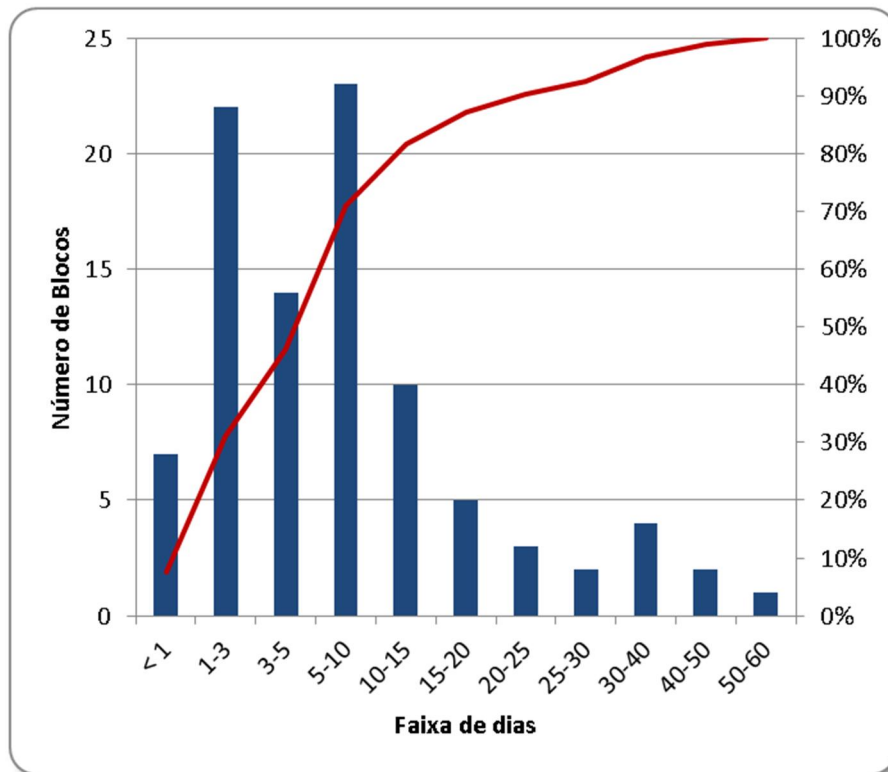
das áreas disponíveis, a quantidade de colhedoras disponíveis e o tempo de deslocamento das frentes, este último fator apenas no caso dos Modelos 1 e 1B.

Gráfico 14: Histograma do potencial de (a) colheita (b) transporte (I A1)



Similarmente à colheita, analisando o potencial de transporte na Tabela 19 e no Gráfico 14(b), percebe-se uma dispersão menor que o potencial de colheita, variando entre 19 e 46 toneladas por hora. Para o caso de um caminhão trabalhando 16,6 horas por dia, sua produção varia de 318 a 840 toneladas por dia. Para uma produção de 10.500 toneladas por dia, se todos os caminhões estiverem em uma condição de produção mínima, são necessárias 33 unidades, todavia, na melhor condição, são necessárias apenas 13. Na condição média são necessários 22,7 caminhões, sendo que a usina dispõe de 25 no total. Também as restrições de capacidade de transporte permitem um equilíbrio entre o potencial das áreas disponíveis e a quantidade de caminhões disponíveis.

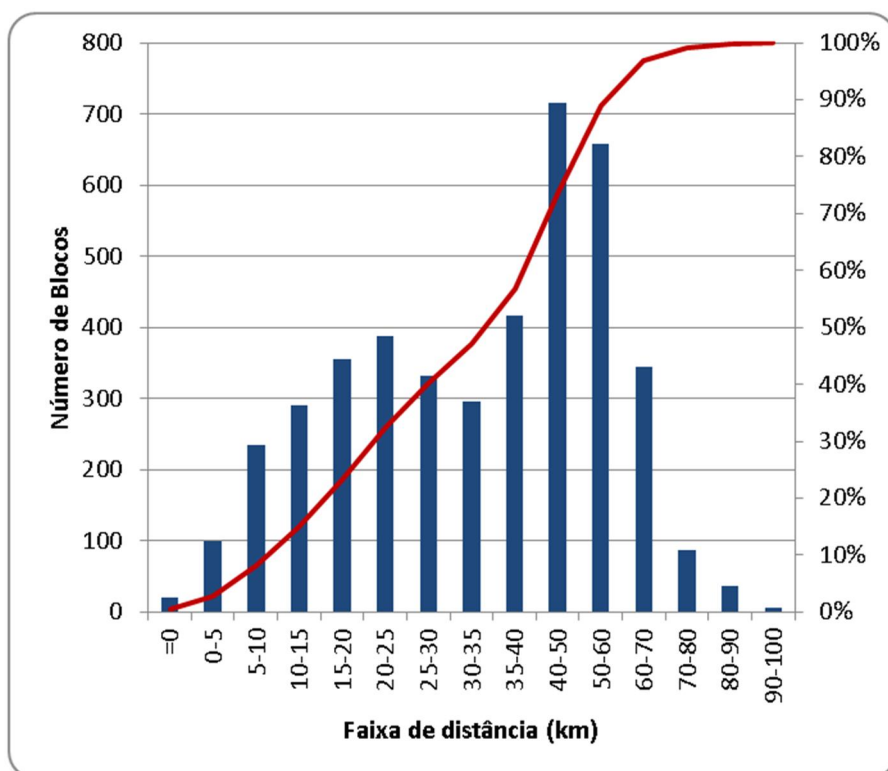
O Gráfico 15 mostra o tempo de permanência em cada bloco considerado de uma frente de colheita contendo cinco colhedoras. Cabe ressaltar que uma frente com cinco colhedoras é o cenário com maior número de deslocamento das frentes, portanto mais crítico para os modelos estudados. Neste cenário, o valor mínimo de permanência é de 0,1 dias, a mediana é de 5,3 dias, a média de 9,5 e o máximo de 53,3. O Gráfico 15 também mostra que em menos de 10% dos blocos, o tempo de permanência é inferior a um dia e em cerca de 30%, este tempo é inferior a três dias. Sendo assim, a quantidade de micropéridos adotados para esta instância de dados foi de dez por frente em um período mensal. Isto equivale a uma mudança de área da frente de colheita a cada três dias. Esta definição é bastante crítica para definir o porte do modelo e, pelos dados apresentados, é bastante razoável pelo fato de três dias de permanência da frente no bloco estar abaixo da média e da mediana.

Gráfico 15: Histograma do tempo de permanência das frentes (I A1)

As distâncias entre blocos foram estimadas com base na distância Euclidiana entre suas coordenadas (vide seção 4.2.1 para o cálculo das coordenadas do bloco agregado). Estas distâncias Euclidianas foram corrigidas por um percentual de 30%. O Gráfico 16 mostra o histograma da distância de deslocamento entre os blocos de colheita. Como este deslocamento forma uma matriz simétrica, foi considerado apenas um lado da matriz e excluiu-se a diagonal, que possui apenas valores iguais a zero.

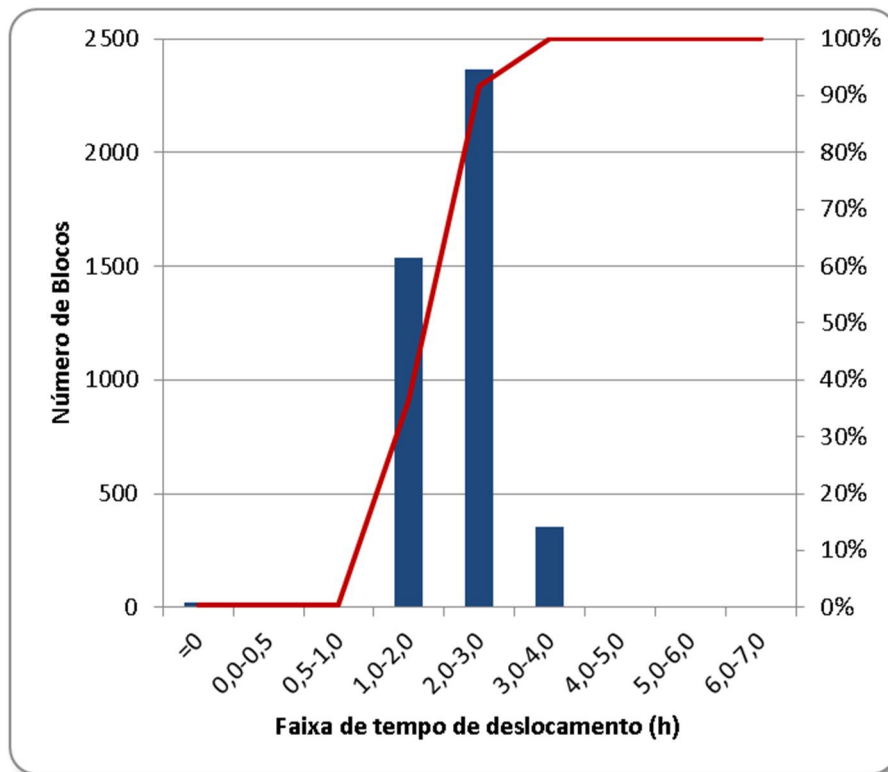
Observando o Gráfico 16, percebe-se que há distâncias iguais a zero para o deslocamento entre blocos. Isto é explicado pelos blocos agregados que possuem mais de um padrão temporal. Além disso, observa-se que cerca de 50% dos dados possuem deslocamentos inferiores a 35 quilômetros. Estes deslocamentos são aqueles que causam menor impacto na capacidade de colheita das frentes, pois tomariam menos tempo delas. Há outra concentração de dados com distâncias entre 35 e 70 quilômetros, que representam deslocamentos mais custosos em tempo para a capacidade de colheita das frentes.

Gráfico 16: Histograma da distância de deslocamento entre os blocos (I A1)



A partir das distâncias entre os blocos foi calculado o tempo de deslocamento, estimando-se uma velocidade de 40 quilômetros por hora dos veículos de transporte para ida, um tempo de embarque e desembarque das colhedoras de 30 minutos, bem como uma eficiência de 85% nesta operação. Esta eficiência representa os casos em que há mais colhedoras que veículos prancha e foi necessário que a colhedora aguarde a viagem de retorno de outra colhedora para que ela seja transportada. Assim, o Gráfico 17 mostra o histograma do tempo de deslocamento entre blocos de colheita.

Neste histograma, percebe-se que foram mantidos os deslocamentos com tempo zero, pois neste caso não foram considerados os tempos de embarque e desembarque. Cabe ressaltar também que estes tempos de embarque e de desembarque possuem um peso relevante no cálculo, já que equivale ao deslocamento de 40 quilômetros. Por isso, possui uma dispersão diferente do histograma de distâncias.

Gráfico 17: Histograma do tempo de deslocamento entre os blocos (I A1)

Por fim, a Tabela 20 mostra os parâmetros analisados por macroperíodo. Para a safra foram definidos oito macroperíodos relacionados ao mês com turnos de 24 horas. A capacidade se refere às horas disponíveis às frentes de colheita e ao transporte levando em conta os dias efetivos de safra, ou seja, é descontado o tempo esperado de parada da usina para manutenção. Cabe ressaltar que as quebras por manutenção e demais paradas específicas das colhedoras estão sendo consideradas nas 14 horas trabalhadas. O mesmo acontece com os caminhões em relação às 16,6 horas trabalhadas. Já a demanda esperada é calculada considerando as horas disponíveis no macroperíodo e a moagem horária, que, no caso de 10.500 toneladas por dia, é 437,5 toneladas por hora. As demandas mínimas e máximas foram calculadas para o caso do Modelo 1B, com uma margem de 2% acima ou abaixo da moagem esperada.

Tabela 20: Definição de parâmetros por macroperíodo (I A1)

	Capacidade (h)	Demanda mínima (t)	Demanda máxima (t)	Demanda esperada (t)
		mec	mec	mec
P1	496	212.717	221.399	217.058
P2	632	271.144	282.211	276.678
P3	634	271.659	282.747	277.203
P4	684	293.474	305.452	299.463
P5	684	293.474	305.452	299.463
P6	634	271.659	282.747	277.203
P7	632	271.144	282.211	276.678
P8	384	164.642	171.362	168.002

Conhecendo-se as demandas de moagem por macroperíodo e conhecendo a quantidade de matéria-prima por padrão temporal, é possível fazer um balanceamento prévio para identificar infactibilidade na resolução dos modelos propostos. Na Tabela 21 foi feito este balanceamento preliminar com uma heurística simples. Primeiro atendeu-se os primeiros macroperíodos com os padrões temporais mais precoces, depois os médios e os tardios. Se em algum período faltou matéria-prima, utilizou-se o padrão referente às áreas a serem plantadas.

Tabela 21: Balanceamento preliminar (I A1)

Período	11111111	11100000	11110000	01110000	00111100	00111110	00011000	00011100	00001111	00000011	Total
1		217.058									217.058
2		106.568	155.844	14.266							276.678
3				16.510	260.693						277.203
4					299.463						299.463
5					149.876	5.277	8.170	13.313	122.827		299.463
6	234.370								42.833		277.203
7	256.186									20.492	276.678
8	168.002										168.002
Total	658.558	323.626	155.844	30.776	710.031	5.277	8.170	13.313	165.660	20.492	2.091.747

Analisando-se a Tabela 21, percebeu-se que há viabilidade em termos de balanceamento entre moagem e matéria-prima disponível levando em conta os padrões temporais. Além disso, percebe-se que as áreas a serem plantadas devem suprir falta de matéria-prima média e tardia, nos macroperíodos 6, 7 e 8.

5.1.3 Implementação computacional e análise dos experimentos

Os Modelos 1 (equações (47)-(61)), 1A (equações (64)-(78)) e 1B (equações (85)-(102)) foram implementados em GAMS versão 24.1.3 e utilizou-se como *solver* o CPLEX 12.5.1.0 para resolver a instância A1 em um computador de alto desempenho do

laboratório do Grupo de Estudos em Pesquisa Operacional (GPO) do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (DEP-UFScar), GPO-Zeus (processador Intel i7-3770 com oito núcleos e 16GB de memória RAM). Convém lembrar que essa instância envolve mais de 30 mil variáveis e três milhões de restrições.

Esta etapa da pesquisa foi bastante desafiadora e iterativa. Os resultados iniciais não foram animadores e a busca para encontrar uma boa solução para um problema deste porte levou a modificações do Modelo 1 original (restrições (47)-(61)), resultando nos Modelos 1A (restrições (64)-(78)) e 1B (restrições (85)-(102)) descritos no capítulo anterior. As subseções a seguir mostram esta trajetória até a obtenção dos resultados com o Modelo 1B, que atenderam as expectativas dos tomadores de decisão para a instância A1.

5.1.3.1 Modelo 1

Primeiramente, foi executado o Modelo 1' (restrições (32), (47)-(55) e (59)-(61)) na configuração *default*, mas solicitando a utilização automática do número de núcleos que forem necessários para garantir o melhor desempenho do CPLEX. Na execução do CPLEX também foram configurados três parâmetros de parada: o número máximo de iterações permitidas, o tempo máximo de execução e o valor do *Gap* de otimalidade aceitável (vide seção 3.3.2.1). Após o procedimento de agregação dos dados, foram implementados os seguintes métodos heurísticos (i) a (vi) para a solução do problema completo:

- i. *Relax-and-fix* decompondo o período (*forward*).
- ii. *Relax-and-fix* decompondo o período (*backward*).
- iii. *Relax-and-fix* decompondo o período e a frente de colheita (*forward*).
- iv. *Relax-and-fix* decompondo o período e a frente de colheita (*backward*).
- v. *Relax-and-fix* decompondo o período (*forward*) com *overlapping*.
- vi. *Relax-and-fix* decompondo o período (*backward*) com *overlapping*.

Em conjunto com a execução do Modelo 1' sem as heurísticas (i) a (vi), foram feitos alguns testes para a configuração de parâmetros. O número de iterações foi testado até que ele não fosse limitante nem provocasse estouro de memória, resultando no valor final de 10.000.000. Quanto ao limite de tempo para execução, vários valores foram configurados, chegando ao limite máximo de uma semana. Apesar de ser um tempo alto, como se trata de um plano para a safra, supõe-se ser viável aguardar bastante tempo, por exemplo, uma semana. A tolerância do valor do *Gap* de otimalidade foi definida como 0. Entretanto, não foi encontrada nenhuma solução factível para o Modelo 1', instância A1, com o GAMS/CPLEX em uma semana de execução.

Após estes resultados iniciais, desfavoráveis para a instância A1, revisou-se a modelagem do problema, substituíram-se as restrições (32) propostas por Meyr (2002) e Meyr e Mann (2013) pelas restrições (37-38) propostas por Wolsey (1998) e Ferreira *et al.* (2012), buscando reduzir o tamanho do Modelo 1' (vide seção 3.3.1.7). Também foram inseridas as restrições (39) propostas por Fleishmann e Meyr (1997) e Ferreira *et al.* (2012) como tentativa de obter uma solução factível com maior facilidade (vide seção 3.3.1.7). Com estas modificações o Modelo 1' (restrições (32), (47)-(55) e (59)-(61)) tornou a forma do Modelo 1 (restrições (47)-(61)) como apresentado na seção 4.1.1.1. Experimentos complementares foram feitos com o Modelo 1 variando parâmetros como ligar ou desligar pré-processamento, utilização de heurísticas como RINS, *Local Branching* e *Feasibility Pump* (vide seção 3.3.2.2.1). Também nestes experimentos, nenhuma solução factível foi encontrada dentro do limite de uma semana para a instância A1 com o GAM/CPLEX.

As heurísticas (i) a (vi) propostas foram utilizadas com o Modelo 1, mas nenhuma obteve soluções factíveis. Em linhas gerais, todas as estratégias *relax-and-fix* resolveram os subproblemas das primeiras iterações. No entanto, ao executarem a penúltima ou última iteração, as soluções encontradas eram infactíveis. Houve tentativas com vários períodos de tempo, sendo que o limite também foi de uma semana. Tentou-se também trabalhar com maiores tolerâncias de *Gaps*, admitindo uma solução não muito boa para passar para a próxima iteração. Também neste caso, não foram obtidas soluções factíveis. Como a heurística construtiva, *relax-and-fix*, não foi bem sucedida, a etapa de melhoria com o método *fix-and-optimize* não foi aplicada. O número de iterações foi também aumentado para 10.000.000, mas nunca se chegou a esse limite.

Após estes resultados, foram feitos experimentos em que a instância de dados permitiria maior quantidade de graus de liberdade. Assim, foi gerada a instância A2, que é um espelho da A1, ou seja, possui as mesmas 37.200 variáveis inteiras e 3.534.918 restrições de A1, porém sem as restrições de janela de tempo. Desta forma, uma solução factível foi obtida por meio da estratégia *ii (relax-and-fix temporal backward)*, com o *Gap* de 100% e no prazo de uma semana. Esta solução foi obtida tanto no Modelo 1 como no Modelo 1'. A solução obtida pode ser considerada boa para um cenário ideal de referência, mas não é adequado para o planejamento da próxima safra, pois não considera todos os aspectos do canal já implantado. Outra tentativa foi feita reduzindo-se a quantidade de dados da instância A1, criando a instância A3 (1.710 variáveis inteiras e 35.911 restrições). Nesta nova instância, buscou-se também explorar o tipo de colheita manual além do mecanizado. O número de blocos foi reduzido de 93 para 19 com 7 blocos com colheita mecanizada e um dividido entre

manual e mecanizada. O número de frentes foi modificado (reduzido para três), sendo uma delas manual, e o número de macroperíodos foi também reduzido para três. Esta instância também foi testada com o Modelo 1 sem heurísticas e com as heurísticas propostas nesta seção, mas sem sucesso (soluções factíveis).

5.1.3.2 Modelo 1A

Como alternativa aos resultados insatisfatórios do Modelo 1 para a instância A1, a modelagem do problema foi novamente analisada, buscando formas de reduzir a complexidade do modelo. Recorrendo novamente à literatura, observaram-se os resultados de Maes *et al.* (1991), que avaliou o impacto na complexidade do problema do tempo de *setup* diminuindo a capacidade de recursos. Dessa forma, foi proposto o Modelo 1A.

Primeiramente, o Modelo 1A foi utilizado com a instância A3, que obteve solução factível obtida em 28 horas e com um *Gap* de 60%. Apesar de um *Gap* alto, como este modelo é bastante restritivo, a obtenção de uma solução factível já indica uma boa solução do ponto de vista do tomador de decisão. A solução pode ser considerada boa, pois atende às restrições de moagem como os recursos disponíveis. Entretanto, quando este modelo foi utilizado com a instância A1, também não foram obtidas soluções factíveis. Assim, apesar deste modelo ter conseguido tratar a instância A3, mais reduzida, também não foi capaz de tratar a original A1. Desta forma, embora este modelo permita reduzir a complexidade do problema como abordado na literatura, a redução ainda não foi suficiente para tratar o problema proposto.

A Figura 22 resume os experimentos descritos anteriormente na seção 5.1.3.1 para o Modelo 1 e nesta seção para o Modelo 1A, visando a obtenções de soluções factíveis e utilizando-se as instâncias A1, A2 e A3.

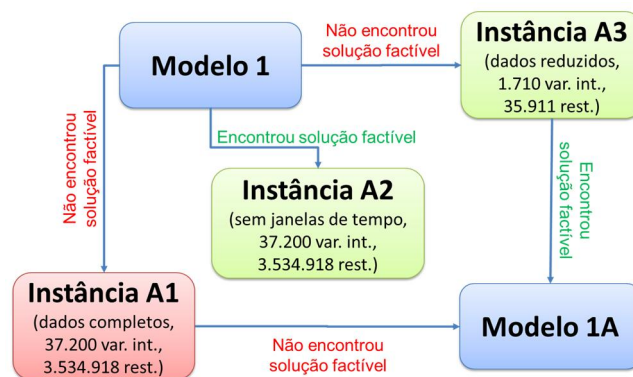


Figura 22: Experimentos utilizados para os Modelos 1 e 1A

A Tabela 22 mostra a lista das instâncias utilizadas neste estudo, bem como as características que as diferenciam. Cabe ressaltar que a letra A ou B representa a empresa a que a instância se refere. As instâncias A1 a A3 estão relacionadas ao problema original da Empresa A, já as instâncias A4 a A12 estão relacionadas com os cenários gerados na seção 5.1.5. A instância B1 está relacionada à resolução do problema para a Empresa B. A primeira coluna da tabela identifica a empresa de onde a instância foi extraída, seguida do número de frentes (F), de blocos agregados (B), de microperíodos, de colhedoras e de caminhões. Além disso, há uma coluna para indicar se foi realizada setorização, se foram consideradas janelas de tempo e se foi utilizado um potencial de colheita único para todos os blocos. Por fim, são apresentadas as quantidades de variáveis binárias geradas e restrições.

Tabela 22: Lista de instâncias e suas características

Instância	Empresa	Frentes	Blocos	Microperíodos	Caminhões	Máquinas	Setorização	Janelas de tempo	Potencial de colheita único	Variáveis binárias	Restrições
<i>A1</i>	A	5	93	80	25	23		X		37.200	3.534.918
<i>A2</i>	A	5	93	80	25	23				37.200	3.534.918
<i>A3</i>	A	3	19	30	19	14		X		1.710	35.911
<i>A4</i>	A	5	73	80	25	23		X		18.150	2.190.163
<i>A5</i>	A	5	73	80	24	22		X		18.150	2.190.163
<i>A6</i>	A	5	73	80	23	21		X		18.150	2.190.163
<i>A7</i>	A	4	73	80	24	22		X		14.520	1.752.163
<i>A8</i>	A	6	73	80	24	22		X		21.780	2.628.163
<i>A9</i>	A	5	73	80	24	22				18.150	2.190.163
<i>A10</i>	A	5	73	80	23	21				18.150	2.190.163
<i>A11</i>	A	5	73	80	24	22	X			18.150	2.190.163
<i>A12</i>	A	5	73	80	24	22	X		X	18.150	2.190.163
<i>B1</i>	B	9	183	48	60	30		X		79.056	17.063.303

5.1.3.3 Modelo 1B

Uma vez que o maior problema nos experimentos com os modelos das seções anteriores era a obtenção de uma solução factível, alterou-se o Modelo 1 buscando uma alternativa que possuísse uma solução factível trivial. Com estas premissas, foi elaborado o Modelo 1B, cuja solução trivial é simplesmente não colher nada e pagar os custos da perda de moagem e cana bisada na função objetivo. Ou seja, a otimização no valor da função objetivo do Modelo 1B leva a soluções factíveis no Modelo 1, mostradas nesta seção.

A Tabela 23 descreve os experimentos realizados com a instância A1 no Modelo 1B sem e com as heurísticas (i)-(vi), ordenados de forma a facilitar a compreensão do

leitor. Esta tabela está organizada em cinco blocos de colunas. O primeiro bloco diz respeito aos resultados obtidos pela execução do Modelo 1B: valor da função objetivo, *Gap* de otimalidade e tempo de execução. O segundo bloco mostra a configuração de parâmetros do GAMS/CPLEX utilizada em cada experimento: se as heurísticas *RINS*, *Feasibility Pump* e *Local Branching* estavam ligadas; se os processos básicos do CPLEX de *Presolve* e planos de corte estavam ligados; se a ênfase de resolução do Modelo estava configurada priorizando otimização, factibilidade ou automática; e o tempo limite de execução (*reslim*) nos experimentos em que não foram executadas as heurísticas. O terceiro bloco descreve o desenho da heurística construtiva do tipo *relax-and-fix*, por meio dos seguintes itens: se a partição em subproblemas foi temporal, com base no recurso (frentes de colheita) ou uma combinação das duas; no caso de ser temporal, se a estratégia foi *forward* ou *backward*; se em qualquer uma das duas partições possíveis houve *overlapping*; e o tempo limite de execução de cada subproblema. O quarto bloco trata da configuração da heurística de melhoria do tipo *fix-and-optimize*, identificando as seguintes configurações: se a partição em subproblemas foi feita com base nos blocos ou temporal *forward*; se em qualquer uma das duas partições possíveis houve *overlapping*; e o tempo limite de execução de cada subproblema. O quinto bloco trata de uma modificação feita no modelo, tratando a variável *z* como real ou inteira. Outros parâmetros adotados que não variaram ao longo dos experimentos foram: a escolha automática do CPLEX da quantidade de núcleos do processador; o número máximo de iterações (*iterlim*) de 10.000.000; a reserva de memória (*workmem*) de 30GB; e o *Gap* de otimalidade aceitável para o término da execução (*optcr*) de 0.

Primeiramente, a instância A1 foi resolvida pelo Modelo 1B sem as heurísticas construtivas e de melhoria, isto é, apenas com o Modelo 1B limitado por tempo. Os experimentos 1, 2 e 3 comparam os parâmetros do CPLEX, mostrando que as heurísticas de *feasibility pump* enfatizando qualidade da solução e *local branching* não ajudaram a melhorar a qualidade da solução, como mostra o experimento 1. Entretanto, a heurística de RINS trouxe resultados relevantes para a qualidade da solução, por exemplo, quando comparamos o experimento 2 com o 3, apesar de seu *Gap* ainda ser alto. Dentre as três soluções, cabe ressaltar que os experimentos 1 e 2 apresentam uma solução de baixa qualidade, pois resultam em muita falta de cana para a usina, já a qualidade do experimento 3 é razoavelmente boa, pois apesar do valor da função objetivo ser maior que zero, a quantidade de falta de cana é desprezível. O valor da função objetivo está baseado em sobra de cana para o ano seguinte, ou seja, em cana bisada em volume pouco significativo 18.232 toneladas que representaria

menos de dois dias efetivos de moagem. Por ter sido o mais bem sucedido, o experimento 4 será analisado com maior detalhe na seção 5.1.4.

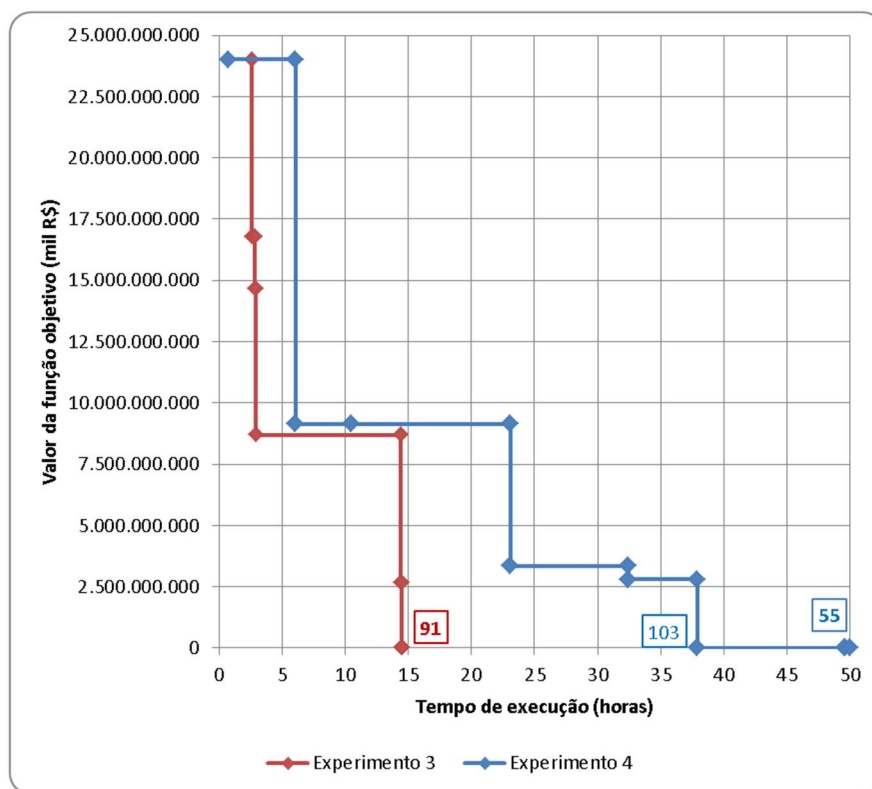
Para os próximos experimentos, que envolvem a aplicação das heurísticas (i)-(vi) junto com o Modelo 1B, optou-se então por utilizar a configuração com RINS, pré-processamento e plano de cortes ligados, com a ênfase do *feasibility pump* em otimalidade e *local branching* desligado. Nos experimentos 5, 6, 7, 8 e 9 foram testadas diferentes estratégias *relax-and-fix* com partição temporal da variável inteira. Os experimentos 5 e 6 utilizaram as estratégias *forward* e *backward*, respectivamente. Como a estratégia *backward* foi a mais bem sucedida, no experimento 7 foi aplicado este mesmo procedimento com sobreposição de períodos (*overlapping*). O experimento 8 utilizou o método *relax-and-fix* calculando de maneira alternada os subproblemas do primeiro e último macroperíodos, depois o segundo e o penúltimo e, assim sucessivamente. O experimento 9 utilizou o *relax-and-fix* com a variável inteira particionada por macroperíodo e por frente. Destes experimentos, o que obteve melhor valor da função objetivo foi o experimento 6, mostrando que a estratégia mais bem sucedida é o *relax-and-fix backward*, mas esta solução é pior do que as obtidas pelo Modelo 1B nos experimentos 3 e 4.

O próximo passo foi realizar modificações no modelo e nos parâmetros CPLEX para a heurística *relax-and-fix* temporal *backward* e identificar a configuração que obtém uma solução de melhor qualidade. Estes testes foram realizados nos experimentos 10 a 17. Destaque para o experimento 10 que tratou a variável z , considerada linear nos Modelos 1, 1A e 1B, como inteira, e obteve igual resultado ao experimento 6, em que é definida como linear. Os experimentos 16 e 17 mostraram também que desligar o plano de cortes e o pré-processamento geram soluções ruins no primeiro caso e no segundo, o CPLEX não conseguiu obter qualquer solução factível dentro do tempo limite. Destaque também para o experimento 13 em que a utilização do *local branching* e RINS proporcionaram melhor qualidade da solução que RINS sem o *local branching*. Já os experimentos 14 e 15 mostram resultados interessantes quando comparados com os experimentos 6 e 13, que variam *RINS* e *local branching*. Apesar dos experimentos ligando as heurísticas *RINS* e *local branching* apresentarem melhor solução que com uma das duas desligada, foi obtida uma solução de melhor qualidade quando as duas heurísticas ficaram desligadas. Estes resultados dos experimentos com as heurísticas (i) a (vi), contrastaram com o obtido pelo experimento 3 (sem heurística), em que configurar o RINS ligado proporcionou melhor resultado do que com ele desligado.

Os experimentos 18, 19 e 20 utilizaram a melhor configuração do CPLEX (*RINS* desligado) para a heurística construtiva mais bem sucedida (partição de y temporal *backward*) e aplicam a heurística de melhoria *fix-and-optimize* com três estratégias distintas. O experimento 19 mostra que o *fix-and-optimize* com partição temporal com *overlapping* proporcionou uma melhoria significativa do valor da função objetivo, de 98%, entretanto, isto demandou o dobro do tempo computacional. A comparação entre os experimentos 18 e 19, que variaram apenas a utilização de *overlapping* no *relax-and-fix*, mostrou que apesar de chegarem a resultados diferentes na etapa construtiva, com a heurística de melhoria, chegaram a resultados iguais no mesmo tempo computacional. Quanto à segunda proposição do *fix-and-optimize*, particionando os blocos de colheita se obteve uma qualidade de solução pior do que a partição temporal. Cabe ressaltar que as soluções dos experimentos 18, 19 e 20 são comparáveis às dos experimentos 3 e 4, com boa qualidade, pois a solução de todos atendeu à demanda de moagem e bisou pouca cana.

Quanto aos tempos computacionais, primeiramente, ao executar os experimentos 1, 2 e 3, utilizou-se um tempo de 14,5 horas (52.200 segundos) para a obtenção de soluções para o problema. Entretanto, em testes preliminares com as heurísticas, o tempo aumentou para 50 horas. Como a solução de boa qualidade obtida com as heurísticas (construtiva com o *relax-and-fix* e de melhoria com o *fix-and-optimize*) foi em um tempo de execução de 50 horas, foi gerada uma solução no modelo sem heurísticas com tempo de execução limitado em 50 horas (experimento 4) como base para comparação. O Gráfico 18 mostra a evolução dos valores da função objetivo dos experimentos 3 e 4 em função do tempo de execução. Observando este gráfico, percebe-se que com aproximadamente 38 horas de execução, o experimento 4 obteve uma solução boa, podendo indicar um possível momento de parada da execução do GAMS/CPLEX. O mesmo não ocorre com o experimento 3, que obtém o valor final da solução muito próximo do tempo de execução limite.

Gráfico 18: Função objetivo x Tempo de execução (M 1B, I A1)



Os *Gaps* foram calculados com base no maior limite inferior obtido pelo modelo resolvido sem heurísticas. Apesar de todos os *Gaps* serem altos, indicando oportunidade de melhoria das soluções obtidas ou do limitante inferior, pode-se dizer que os experimentos 3, 4, 18, 19 e 20 apresentaram soluções com resultados bem aceitáveis na prática. Estas soluções podem ser consideradas boas, pois foram penalizadas apenas pela cana bisada, sem ter havido falta de matéria-prima. Embora o experimento 4 tenha apresentado a solução de melhor qualidade, o experimento 3 já apresentou uma solução razoavelmente boa em um tempo de execução muito menor (vide Gráfico 18). Já as heurísticas propostas, obtiveram bons resultados quando combinadas (construtiva + melhoria), mas não se pode dizer que foram melhores que o CPLEX com tempo de execução equivalente limitado. A qualidade dos resultados dos experimentos 18 e 19 foi equivalente à do experimento 4 com tempos de execução similares.

Por fim, os valores da variável y obtidos pelo experimento 4 foram alimentados no Modelo 1 como parâmetro de entrada, que obteve uma solução factível com estes valores, já que ele aceita que bise cana, mas não que falte moagem. Sendo assim, este seria mais um aprimoramento do método heurístico: primeiro rodar o Modelo 1B e depois utilizar sua solução como solução inicial no Modelo 1. Entretanto, este aprimoramento não pode ser

devidamente explorado nesta pesquisa em função do prazo para a defesa da tese, mas é tópico interessante para pesquisa futura.

Tabela 23: Experimentos computacionais com o Modelo 1B (M 1B, I A1)

Experimentos	Resultados			Parâmetros CPLEX							Construtiva (Relax&Fix)					Melhoria (Fix&Optimize)				Modelo	
	Valor da função objetivo	Gap (%)	Tempo de execução	RINS	Feasibility Pump	Local Branching	Presolve	Cortes	ênfase	reslim	Temporal	Forward	Backward	Frente	Overlapping	reslim	Bloco	Temporal (forward)	Overlapping	reslim	Var z
1	38.926.107	99,98	14:30:45	X	X	X	X	X	auto.	52.200											Real
2	138.195.912	100,00	14:30:54				X	X	auto.	52.200											Real
3	91.160	92,82	14:31:18	X			X	X	auto.	52.200											Real
4	55.274	88,16	50:00:55	X			X	X	auto.	180.000											Real
5	21.169.579	99,97	05:23:08	X			X	X	auto.		X	X			10.800						Real
6	4.211.778	99,84	24:13:26	X			X	X	auto.		X	X			10.800						Real
7	28.134.339	99,98	08:15:44	X			X	X	auto.		X	X		X	10.800						Real
8	21.169.579	99,97	08:00:14	X			X	X	auto.		X	X	X		10.800						Real
9	21.981.983	99,97	96:37:11	X			X	X	auto.		X	X	X	X	10.800						Real
10	4.211.778	99,84	24:30:57	X			X	X	auto.		X	X			10.800						Inteira
11	28.314.670	99,98	09:26:20	X		X	X	X	otim.		X	X			10.800						Real
12	28.314.670	99,98	10:02:55	X	X		X	X	auto.		X	X			10.800						Real
13	4.165.363	99,84	24:10:18	X		X	X	X	auto.		X	X			10.800						Real
14	6.005.385	99,89	23:51:13			X	X	X	auto.		X	X			10.800						Real
15	3.758.040	99,83	23:59:56				X	X	auto.		X	X			10.800						Real
16	40.959.284	99,98	09:37:12				X		auto.		X	X			10.800						Real
17	sem solução		06:12:34			X		X	auto.		X	X			10.800						Real
18	59.062	88,92	50:54:40				X	X	auto.		X	X		X	10.800		X	X	21.600		Real
19	59.062	88,92	49:15:09				X	X	auto.		X	X			10.800		X	X	21.600		Real
20	158.847	95,88	24:44:59				X	X	auto.		X	X			10.800	X		X	2.700		Real

5.1.3.4 Considerações sobre a aplicação dos Modelos

Após os experimentos realizados com o Modelo 1 (seção 5.1.3.1), Modelo 1A (seção 5.1.3.2) e Modelo 1B (seção 5.1.3.3) para a instância A1 do estudo de caso, verificou-se que o primeiro e o segundo não foram capazes de obter uma solução factível devido ao fato de serem mais restritivos. Por outro lado, o Modelo 1B possui soluções factíveis triviais e foi capaz de gerar soluções factíveis com boa qualidade para a instância A1, muito embora não tenha sido possível obter soluções com *Gaps* bem apertados.

Embora fosse possível realizar mais testes com os Modelos 1, 1A e 1B, alterando-se configurações do CPLEX ou propondo-se diferentes estratégias de partição das variáveis inteiras nas heurísticas, devido ao elevado tempo computacional e ao prazo limite para o término desta pesquisa, os resultados apresentados foram suficientes para obter soluções de qualidade para o estudo de caso.

5.1.4 Análise da solução obtida

A solução analisada nesta seção refere-se à encontrada no experimento 4, utilizando a instância A1 e o Modelo 1B, uma vez que ela apresentou melhor qualidade dentre as que foram consideradas boas. A Tabela 24 mostra a análise da moagem, contemplando a produção planejada de 2.080.692 toneladas na safra dividida por macroperíodo. Este plano atende em todos os macroperíodos a restrição de moagem mínima, todavia nos períodos P1, P2, P7 e P8 a colheita é superior à moagem mínima. O plano também não extrapola a quantidade moída máxima, chegando ao seu limite em P7 e P8. A sigla (M 1B, E 4, I A1) representa que a solução provém do Modelo 1B, experimento 4 e instância A1.

Tabela 24: Análise da moagem (M 1B, E 4, I A1)

Macroperíodo	Produção (t)	Moagem Mínima (t)	Acima da moagem mínima (t)	Moagem Máxima (t)	Abaixo da moagem máxima (t)
P1	220.603	212.717	7.886	221.399	797
P2	276.252	271.144	5.107	282.211	5.960
P3	271.659	271.659	0	282.747	11.088
P4	293.474	293.474	0	305.452	11.979
P5	293.474	293.474	0	305.452	11.979
P6	271.659	271.659	0	282.747	11.088
P7	282.211	271.144	11.067	282.211	0
P8	171.362	164.642	6.720	171.362	0
Total Geral	2.080.692	2.049.912	30.780	2.133.582	52.890

Do total de 2.091.747 toneladas de cana disponível, sobraram 11.055 toneladas de cana bisada (3.450t do bloco b37 e 7.604t de b75). Este valor representa o valor da função objetivo maior que zero de 55.274 unidades monetárias, considerando uma tonelada de cana bisada a cinco unidades monetárias. Nesta solução, ainda havia capacidade industrial para absorver esta moagem, porém não havia capacidade para os recursos de colheita e transporte para tal. A Tabela 25 mostra a análise da capacidade dos recursos de colheita e transporte. Ela mostra a quantidade de horas disponíveis por macroperíodo, o quanto foi utilizado pelos recursos de transporte e pelos de colheita. No caso da colheita, a utilização da capacidade foi desmembrada em dois pontos: operação, representando o tempo em que os recursos estiveram de fato trabalhando, e deslocamento, representando o tempo perdido com o deslocamento de recursos entre as áreas.

Tabela 25: Análise da capacidade (M 1B, E 4, I A1)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	496	632	634	684	684	634	632	384	4.781
Transporte	414	523	615	659	616	545	632	384	4.389
<i>% Folga</i>	17%	17%	3%	4%	10%	14%	0%	0%	8%
Colheita									
Total									
<i>Operação</i>	487	610	617	666	670	620	522	308	4.500
<i>Deslocamento</i>	9,0	22,5	16,1	18,3	14,5	14,0	33,8	16,3	145
<i>Total</i>	496	632	634	684	684	634	556	324	4.645
<i>% Deslocamento</i>	2%	4%	3%	3%	2%	2%	6%	5%	3%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	12%	16%	3%

Analisando a Tabela 25, percebe-se que os macroperíodos P7 e P8 exigiram mais dos recursos de transporte, enquanto que de P1 a P6, os recursos de colheita foram os mais exigidos. No geral, houve folga dos recursos, 8% para os recursos de transporte, e 3%, para colheita. Do tempo total dos recursos de colheita, cerca de 3% do tempo foi destinado ao deslocamento, sendo ele mais intenso em P7 e P8. A Tabela 21 da seção 5.1.2 mostrou a necessidade de se plantar áreas com variedades para o final da safra. Assim, como as áreas de plantio possuem uma produtividade maior que as demais, proporcionam maior capacidade de colheita aos recursos, originando esta folga adicional nos últimos macroperíodos. Com isso, possibilitou atingir o nível máximo de moagem, passando o recurso de transporte a ser restritivo. Embora o potencial de transporte das áreas de plantio seja menor que a média, sua diferença não é significativa, menos de uma tonelada por hora por veículo.

A Tabela 26 detalha por frente os recursos de colheita apresentados na Tabela 25. Ela mostra que entre as frentes há diferenças nos níveis de folga de capacidade, sendo que as frentes 3 e 4 têm folga nos últimos períodos. O deslocamento das frentes é bastante parecido, girando em torno de 3%.

Tabela 26: Análise da capacidade de frentes de colheita (M 1B, E 4, I A1)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	496	632	634	684	684	634	632	384	4.781
Colheita									
<i>F1 Operação</i>	488	615	610	659	668	623	591	364	4.617
<i>Deslocamento</i>	8,6	17,5	24,0	25,4	16,1	10,7	41,2	20,3	164
<i>Total</i>	496	632	634	684	684	634	632	384	4.781
<i>% Deslococamento</i>	2%	3%	4%	4%	2%	2%	7%	5%	3%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>F2 Operação</i>	492	595	621	673	654	623	588	358	4.603
<i>Deslocamento</i>	3,9	37,5	12,3	11,7	30,3	11,0	44,6	20,2	172
<i>Total</i>	496	632	634	684	684	634	632	378	4.775
<i>% Deslococamento</i>	1%	6%	2%	2%	4%	2%	7%	5%	4%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%
<i>F3 Operação</i>	490	625	623	676	681	626	505	353	4.579
<i>Deslocamento</i>	6,1	7,2	10,9	8,2	4,0	7,2	36,3	25,7	106
<i>Total</i>	496	632	634	684	684	634	541	379	4.685
<i>% Deslococamento</i>	1%	1%	2%	1%	1%	1%	7%	7%	2%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	1%	2%
<i>F4 Operação</i>	475	611	620	667	675	607	320	93	4.068
<i>Deslocamento</i>	21,4	21,3	13,6	17,3	9,9	26,6	21,5	4,6	136
<i>Total</i>	496	632	634	684	684	634	342	97	4.204
<i>% Deslococamento</i>	4%	3%	2%	3%	1%	4%	6%	5%	3%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	46%	75%	12%
<i>F5 Operação</i>	491	603	614	655	672	619	607	373	4.635
<i>Deslocamento</i>	5,1	29,1	19,8	29,0	12,3	14,5	25,5	10,9	146
<i>Total</i>	496	632	634	684	684	634	632	384	4.781
<i>% Deslococamento</i>	1%	5%	3%	4%	2%	2%	4%	3%	3%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

A Tabela 27 mostra a quantidade de mudanças de áreas por frente e por macroperíodo. Analisando-a, percebe-se que F2 foi a frente que mudou de área menos (23 vezes); já para as demais, a quantidade de mudança de área foi semelhante, em torno de 33 mudanças. Já observando os macroperíodos, houve maior incidência de mudança em P7. Por fim, deve-se ressaltar que o dimensionamento de dez microperíodos por macroperíodo foi adequado, pois o valor máximo de mudança por mês para uma frente foi de sete. No total, houve 155 mudanças de frente. Se um bloco fosse visitado por apenas uma frente que

terminasse sua colheita, deveria haver 88 mudanças (93 blocos – 5 blocos iniciais de cada frente). Sendo assim, pode-se dizer que por cada bloco passaram, em média, 1,8 frentes de colheita.

Tabela 27: Análise de mudança de área das frentes (M 1B, E 4, I A1)

	F1	F2	F3	F4	F5	Total
P1	2	1	2	6	1	12
P2	3	7	2	5	7	24
P3	5	3	3	3	4	18
P4	7	3	2	4	6	22
P5	4	6	1	3	4	18
P6	3	2	2	5	2	14
P7	7	7	7	5	5	31
P8	4	4	4	1	3	16
Total	35	33	23	32	32	155

O Gráfico 19 mostra a distribuição geográfica das frentes. O Gráfico 20 mostra o sequenciamento da frente 1. O Gráfico 21 mostra o sequenciamento da frente 2. O Gráfico 22 mostra o sequenciamento da frente 3. O Gráfico 23 mostra o sequenciamento da frente 4. O Gráfico 24 mostra o sequenciamento da frente 5. Observando os gráficos, percebe-se que para o plano possibilitar o equilíbrio entre a capacidade de colheita e transporte, uma frente de colheita pode visitar várias vezes um mesmo bloco em épocas diferentes. Um bloco também pode ser visitado por várias frentes. Este conceito de sequenciamento das frentes de colheita, portanto, difere bastante da visão de setorização predominante na prática das usinas. Na verdade, a setorização é uma prática que levaria a boas soluções se fosse considerado apenas o trajeto mínimo das frentes, sem considerar o equilíbrio das capacidades de colheita e transporte.

Cabe ressaltar que não setorizar, do ponto de vista do tomador de decisão, pode tornar seu planejamento caótico, caso não tenha à sua disposição uma ferramenta como a que está sendo proposta nesta tese. A setorização também pode auxiliar no transporte de funcionários, mas, não é sempre que este fator é crítico. Além disso, ainda há dificuldade em resolver o problema de programação das frentes para a safra toda, como é o foco deste trabalho.

Gráfico 19: Distribuição geográfica dos blocos de colheita por frente (M 1B, E 4, I A1)

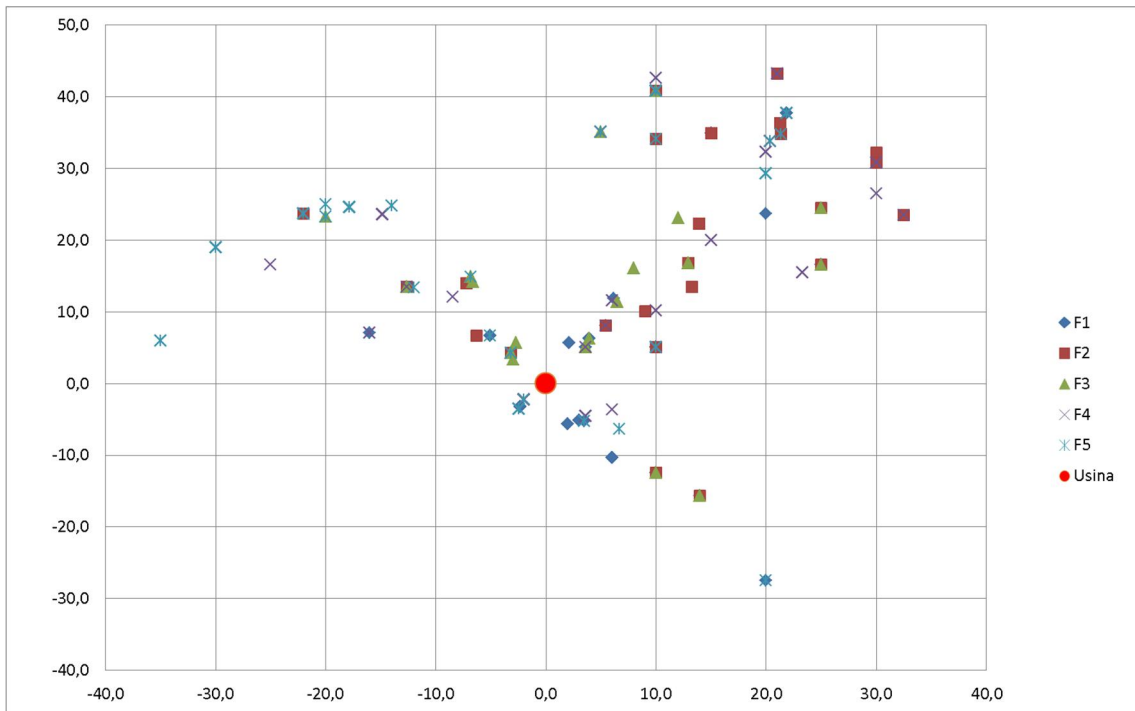


Gráfico 20: Sequenciamento da frente 1 (M 1B, E 4, I A1)

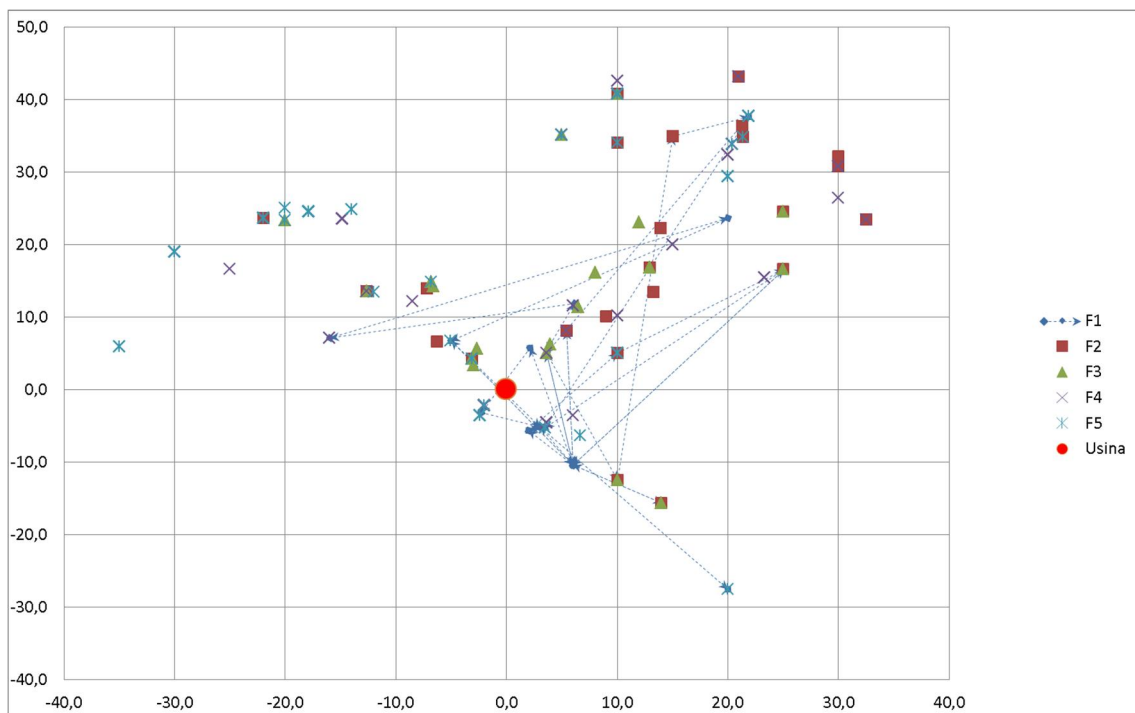


Gráfico 21: Sequenciamento da frente 2 (M 1B, E 4, I A1)

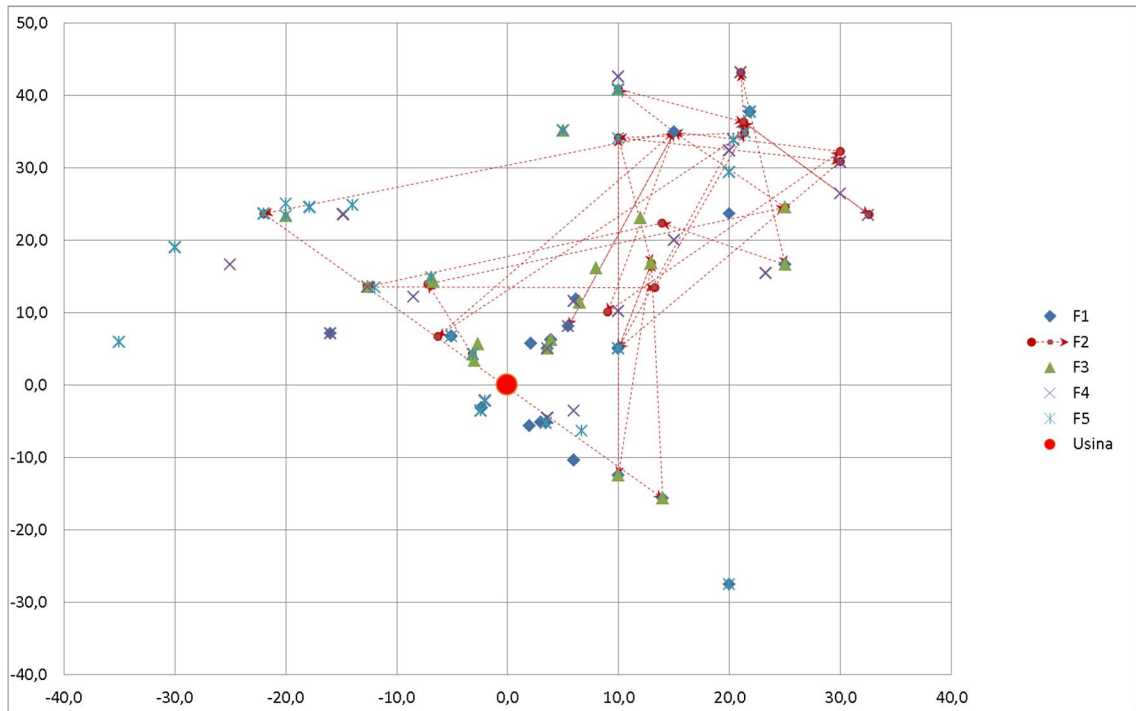


Gráfico 22: Sequenciamento da frente 3 (M 1B, E 4, I A1)

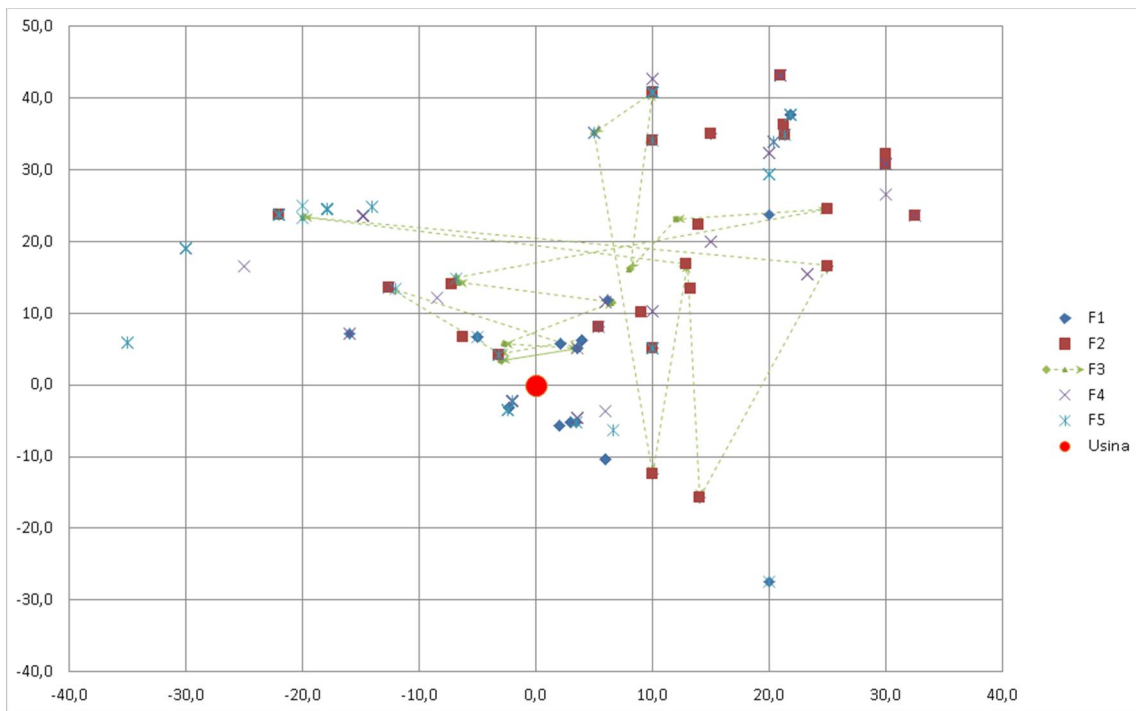


Gráfico 23: Sequenciamento da frente 4 (M 1B, E 4, I A1)

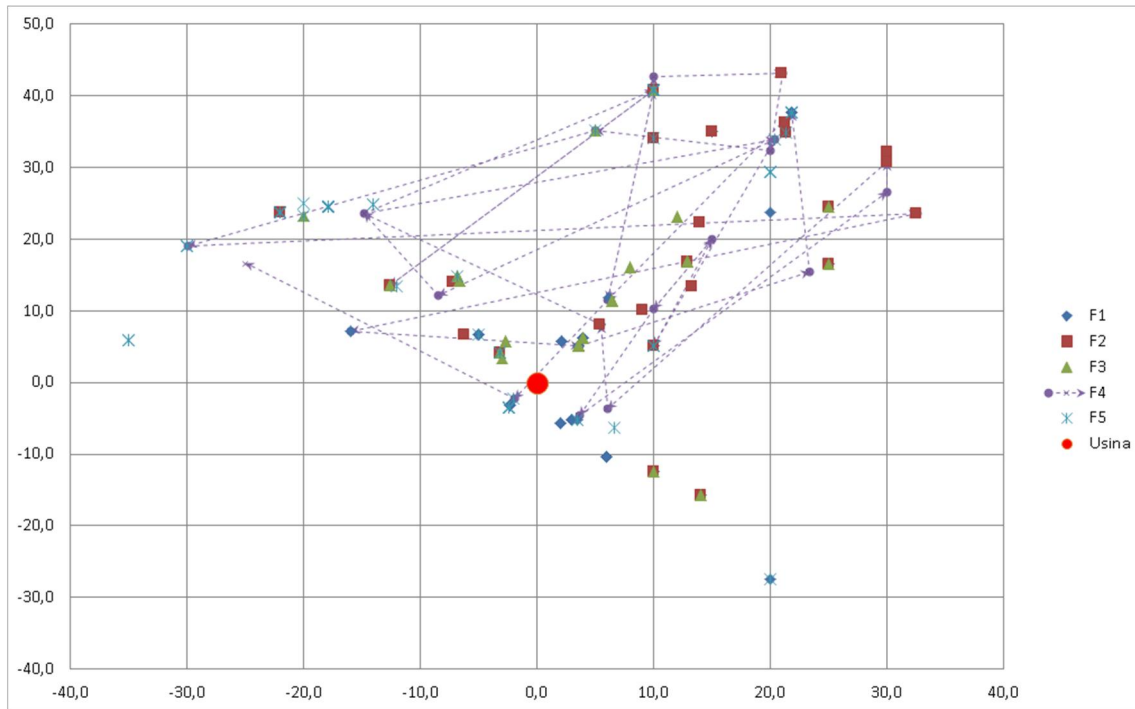
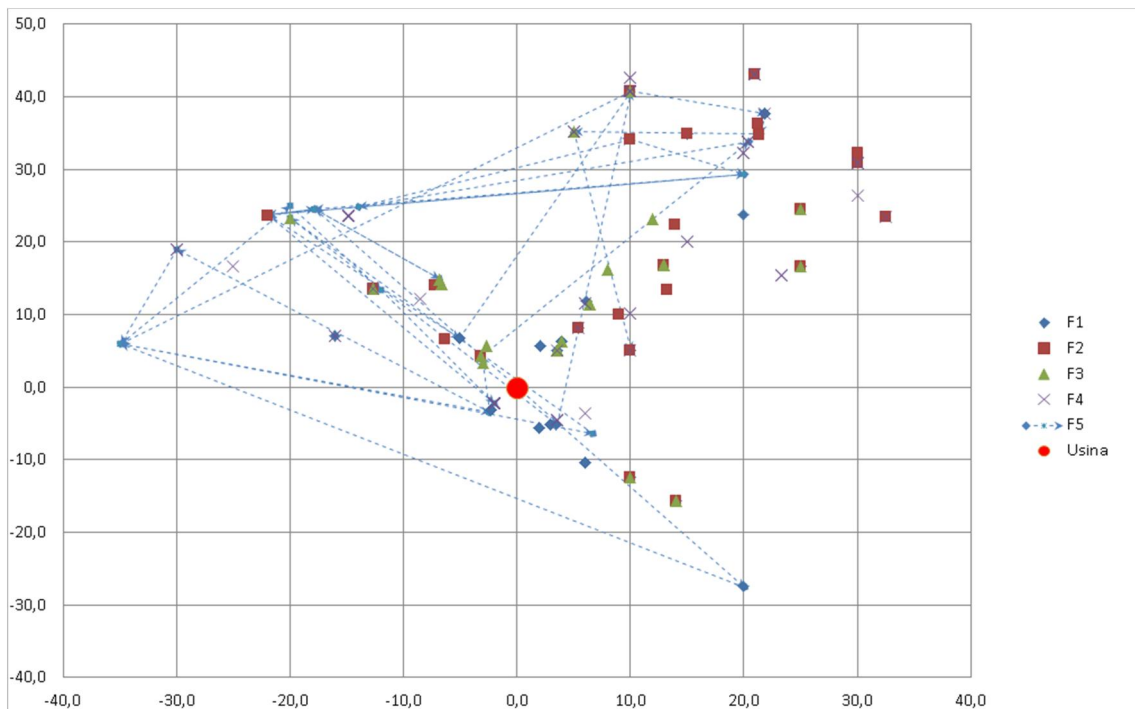


Gráfico 24: Sequenciamento da frente 5 (M 1B, E 4, I A1)



Por fim, a solução obtida do experimento 4, aplicado à instância A1 e utilizando o Modelo 1B, demonstra uma boa qualidade para a programação das frentes de

colheita com as premissas assumidas em 5.1.2. Embora não tenha sido obtida uma solução com $Gap=0$, ou seja, comprovadamente ótima, não houve perda de moagem e a quantidade de matéria-prima bisada pode ser considerada irrelevante. Os dados mostram a importância de se utilizar as capacidades de moagem, transporte e colheita, que inclui a perda de tempo da frente por mudança de área, da forma proposta nesta tese. Embora a setorização apoie o tomador de decisão para obter soluções sem ferramentas como a proposta nesta tese, no estudo de caso da Empresa A, ela não é necessária para a obtenção de uma boa solução. Finalmente, o dimensionamento de microperíodos foi adequado quando confrontado com a quantidade de mudanças de área realizadas pelas frentes de colheita.

5.1.5 Análise de cenários

Nesta seção, algumas modificações na instância A1 apresentada na seção 5.1.2 são feitas, representando possíveis cenários alternativos para a análise do tomador de decisão, bem como alterações nas premissas do modelo, para que seu comportamento seja mais bem entendido e os impactos de algumas variações nos parâmetros da instância A1 sejam mais bem investigados. A seção 5.1.5.1 mostra o comportamento do Modelo 1B frente a uma nova instância de dados, em que o plano proposto foi seguido rigorosamente, tanto para o plantio quanto para a colheita. Já a seção 5.1.5.2 explora o comportamento do Modelo 1B frente à alteração do número de frentes de colheita. A seção 5.1.5.3 analisa a solução apresentada pelo Modelo 1B quando são retiradas as janelas de tempo. Por fim, a seção 5.1.5.4 compara a solução obtida pelo modelo com e sem setorização.

5.1.5.1 Planejamento da segunda safra

Nesta seção foi criada uma nova instância, A4, para a Empresa A baseada na instância A1. Para a geração desta instância de dados, foi simulada uma safra subsequente à representada por A1. Em A4, presume-se que o plano gerado pelo experimento 4 da Tabela 23 foi seguido rigorosamente em termos de colheita e plantio. As áreas aumentaram um corte e, assim, perderam 10% da produtividade, diminuindo o tamanho dos blocos e a capacidade de colheita. As áreas de colheita que iriam para o sexto corte ou mais foram renovadas, aumentando sua produtividade para 100 t/ha no primeiro corte, o que aumenta também o tamanho dos blocos e a capacidade de colheita. As áreas de primeiro corte ganharam o padrão temporal genérico (11111111) e as demais áreas ganharam o padrão temporal da época em que foram colhidas, adicionando o mês antecedente e o mês subsequente à data prevista de colheita. Como a quantidade de matéria-prima processada aumentou, o tempo disponível de

safrã também aumentou, porém sem extrapolar os oito meses de safrã. A Tabela 28 mostra a estatística descritiva da produção e dos potenciais de colheita e transporte.

Tabela 28: Estatística descritiva das características dos blocos agregados (I A4)

	Tamanho dos blocos (t)	Col. (t/h)	Transp. (t/h)
		mec	mec
Mínimo	302	6	19
Mediana	13.119	32	26
Média	30.274	33	28
Máximo	260.743	54	46

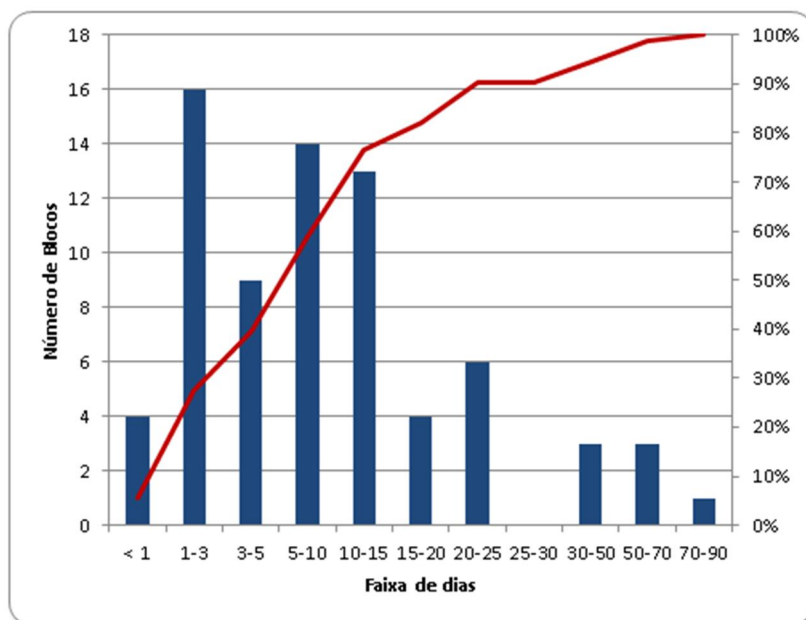
Por meio da análise da Tabela 28, pode-se perceber que os potenciais não se alteraram significativamente em relação aos apresentados na Tabela 19, todavia o tamanho e quantidade de blocos se alteraram. Cabe ressaltar que anteriormente havia 93 blocos de colheita. Na segunda safrã, após aplicada a heurística de agregação de blocos, seção 4.2.1, eles foram reduzidos para 73. Assim, 20 blocos foram agrupados a outros, bem como o tamanho médio e mediano dos blocos aumentou, proporcionando assim uma redução no porte do problema.

O Gráfico 25 mostra o histograma do tempo de permanência das frentes para a instância A4. Comparando este gráfico ao Gráfico 15, relativo à instância A1, percebe-se que a quantidade de blocos com permanência da frente entre um e três dias reduziu. Os blocos com tempos de permanência entre 10 e 15 dias aumentaram significativamente e surgiu um bloco com permanência com cerca de 80 dias de safrã.

Este comportamento não só era esperado, como também representa um dos maiores benefícios vislumbrados por meio da utilização do Modelo 1B como ferramenta de planejamento para guiar o plantio. Conforme mencionado anteriormente (vide seção 2.6), a área de plantio possui maior grau de liberdade em termos de época de colheita. Caso ela não possua qualquer restrição de época inerente à área específica (vide seções 2.5.3, 2.5.4, 2.5.5, 2.5.6 e 2.5.7), pode ser colhida em qualquer mês da safrã, desde que plantada a variedade correta. Por isso salienta-se a necessidade de avaliar quando seria a melhor época para a colheita da área do ponto de vista logístico antes de plantar a variedade. As áreas com variedades já plantadas possuem grau de liberdade da época de colheita limitado em no máximo três meses de safrã (vide seção 2.3). Assim, a utilização do Modelo 1B como ferramenta de planejamento, juntamente com a aderência operacional às suas respostas,

permite reduzir a complexidade da colheita na safra seguinte devido ao maior agrupamento de áreas por padrão temporal.

Gráfico 25: Histograma do tempo de permanência das frentes (I A4)



Esta instância foi resolvida pelo CPLEX 12.5.1.0 implementado GAMS 24.1.3 no computador GPO-ZEUS, gerando o experimento 21. Neste experimento foram analisadas 18.150 variáveis binárias e 2.190.163 restrições, sendo que o Modelo 1B foi configurado igualmente ao do experimento 4 da seção 5.1.3.3. Foi encontrada a solução ótima igual a zero em apenas 28 minutos. Este fato reforça o potencial do Modelo 1B em encontrar boas soluções para o problema em tempos computacionais aceitáveis. A Tabela 29 mostra a análise da capacidade para o experimento 21 com a instância A4.

Tabela 29: Análise da capacidade (M 1B, E 21, I A4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	492	555	566	653	648	634	616	470	4.634
<i>% Folga</i>	18%	12%	11%	5%	5%	0%	3%	15%	8%
Colheita									
Total Operação	587	588	579	659	617	533	596	488	4.647
<i>Deslocamento</i>	7,4	16,6	12,1	13,0	17,1	20,8	19,9	8,9	116
<i>Total</i>	594	604	591	672	634	554	616	497	4.763
<i>% Deslocamento</i>	1%	3%	2%	2%	3%	4%	3%	2%	2%
<i>% Folga</i>	1%	4%	7%	2%	7%	13%	3%	10%	6%

Comparando-se a Tabela 29 com a Tabela 25, referente à instância A1, percebe-se que na safra seguinte foi possível distribuir melhor as folgas de capacidade de colheita e transporte ao longo dos oito meses de safra. Este resultado era esperado, pois foram inseridas mais áreas com padrão temporal |1|1|1|1|1|1|1|1| com produtividade alta, permitindo assim gerar folga de colheita em períodos críticos. Além disso, percebe-se que o percentual de tempo gasto com mudança de área reduziu cerca de 50%, passando de 3,4% do tempo total para 2,4%.

Após estes resultados do experimento 21 para instância A4, foram geradas outras instâncias baseadas nela e realizados novos experimentos. Para a instância A5 a quantidade de recursos foi alterada para 24 caminhões e 22 colhedoras, tendo a frente 3 quatro ao invés de cinco colhedoras. Na instância A6, a quantidade de recursos foi alterada para 23 caminhões e 21 colhedoras, tendo a frente 2 quatro ao invés de cinco colhedoras. Os experimentos 22 e 23 executaram o Modelo 1B, com as mesmas configurações dos experimentos 4 e 21, com base nas instâncias A5 e A6, respectivamente.

Assim como o experimento 21, o 22 encontrou a solução ótima igual a zero em cerca de 20 minutos. A Tabela 30 mostra a análise da capacidade para este experimento. Ela mostra que a folga de capacidade dos recursos reduziu bastante, em especial a de colheita. Já a Tabela 31 mostra a análise de mudança de área das frentes de colheita, em que cada valor representa a quantidade de mudanças de área da frente no macroperíodo.

Tabela 30: Análise da capacidade (M 1B, E 22, I A5)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	519	590	594	653	680	634	606	552	4.827
<i>% Folga</i>	13%	7%	6%	5%	1%	0%	4%	0%	4%
Colheita									
Total <i>Operação</i>	591	621	600	660	674	611	611	491	4.859
<i>Deslocamento</i>	9,1	11,5	18,6	5,9	10,5	16,0	21,1	8,7	101
<i>Total</i>	600	632	619	666	684	627	632	499	4.960
<i>% Deslococamento</i>	2%	2%	3%	1%	2%	3%	3%	2%	2%
<i>% Folga</i>	0%	0%	2%	3%	0%	1%	0%	10%	2%

Ao reduzir uma colhedora e dois transbordos, a um custo de R\$90,49 por hora (vide seção 4.1.2.1), é gerada uma economia de cerca de R\$450 mil em uma safra, considerando que uma colhedora trabalha 5.053 horas na safra. Ao reduzir um caminhão com as respectivas unidades de carga, a um custo de R\$61,46 por hora, gera-se um custo de cerca

de R\$300 mil. No total, a economia gerada do experimento 21 para o 22 é de cerca de R\$750 mil em uma safra.

Tabela 31: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 22, I A5)

	F1	F2	F3	F4	F5	Total
P1	2	3	4	0	0	9
P2	3	4	1	1	1	10
P3	6	4	3	0	4	17
P4	0	0	2	2	3	7
P5	1	1	4	3	3	12
P6	3	4	2	3	3	15
P7	5	7	4	2	2	20
P8	0	3	1	1	4	9
Total	20	26	21	12	20	99

Já no caso do experimento 23, o problema rodou por 50 horas, e encontrou uma solução com *Gap* elevado (98%). A Tabela 32 mostra a análise da moagem para este experimento com a instância A6 e Modelo 1B. Nesta tabela pode-se perceber que, em especial no último período, não foi possível cumprir a demanda mínima de moagem, em especial em P8. A Tabela 33 apresenta a análise de mudança de área das frentes de colheita, em que mostra a quantidade de mudanças da frente por macroperíodo.

Tabela 32: Análise da moagem (M 1B, E 23, I A6)

Macroperíodo	Produção (t)	Moagem Mínima (t)	Acima da moagem mínima (t)	Moagem Máxima (t)	Abaixo da moagem máxima (t)
P1	257.253	257.253	0	267.753	10.500
P2	270.062	271.144	-1.082	282.211	12.149
P3	270.837	271.659	-822	282.747	11.910
P4	292.399	293.474	-1.075	305.452	13.053
P5	293.474	293.474	0	305.452	11.979
P6	271.659	271.659	0	282.747	11.088
P7	271.144	271.144	0	282.211	11.067
P8	231.171	236.672	-5.501	246.332	15.161
Total Geral	2.157.998	2.166.478	-8.480	2.254.906	96.908

Comparando esta última tabela com a Tabela 31 do experimento 22, percebe-se um aumento da quantidade de mudanças de área da frente. O experimento 23 obteve 46 mudanças a mais que o experimento 22. Este fato pode ser explicado da seguinte maneira:

para aumentar a capacidade de transporte e colheita em um dado período, acaba sendo necessário fracionar mais os blocos para encontrar combinações mais adequadas com a capacidade disponível. Entretanto, fracionando-se os blocos, mais tempo é subtraído da capacidade de colheita devido ao deslocamento dos equipamentos. Este comportamento é consistente com os resultados reportados por Maes *et al.* (1991) sobre a complexidade do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com tempos de *setup* nas restrições de capacidade do recurso.

Tabela 33: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 23, I A6)

	F1	F2	F3	F4	F5	Total
P1	1	2	2	2	5	12
P2	6	4	2	0	2	14
P3	3	3	9	4	2	21
P4	1	2	10	2	4	19
P5	5	0	9	3	5	22
P6	3	2	10	3	2	20
P7	4	4	8	2	4	22
P8	4	2	7	0	2	15
Total	27	19	57	16	26	145

Dessa forma, pode-se concluir que, além da utilização do Modelo 1B reduzir a quantidade de blocos e permitir encontrar soluções para o problema ao longo de várias safras, conforme se perde menos tempo com mudanças, podem-se reduzir recursos como caminhões e colhedoras e, com isso, reduz-se custo operacional, cerca de R\$750 mil no caso estudado. O tempo de resolução do modelo também se altera significativamente em caso de excesso de recursos, experimentos 1 e 2, e falta de recursos, experimento 3.

5.1.5.2 Alteração do número de frentes de colheita

Nesta seção é analisado o comportamento do Modelo 1B quando é alterado o número de frentes de colheita. Para que haja esta alteração e seja mantida a capacidade de colheita, é necessário aumentar ou diminuir a quantidade de colhedoras nas frentes de colheita. Ao diminuir o número de colhedoras, de um lado se aumenta o tempo de permanência da frente no bloco e de outro, se reduz a diluição do custo fixo das estruturas da frente, como manutenção móvel, combate a incêndio, equipe de apoio e líder de frente. Quando se aumenta o número de colhedoras, acontece o efeito inverso. Entretanto, frentes com mais de cinco colhedoras começam a exaurir a capacidade da estrutura de uma frente

típica, por exemplo, o caminhão oficina passa a ser insuficiente para ter bons índices de manutenção, o líder da frente passa a ter dificuldade em gerenciar cada uma das colhedoras e o ponto de transbordamento começa a ter dificuldade em carregar unidades de carga no ritmo da produção das colhedoras.

Dessa forma, esta seção baseou-se na instância A5 da seção anterior, 5.1.5.1, e foram geradas as instâncias A7 e A8, resolvidas nos experimentos 24 e 25, respectivamente. No experimento 24, o número de frentes foi reduzido para quatro, sendo que as frentes 1 e 2 possuem seis colhedoras e as frentes 3 e 4, quatro colhedoras. Com isso, o porte do problema nesta instância é de 14.520 variáveis inteiras e 1.752.163 restrições. Já no experimento 25, o número de frentes foi incrementado para seis, sendo que as frentes 1, 2, 3 e 4 possuem quatro colhedoras e as frentes 5 e 6, três colhedoras. Assim, o porte do problema é de 21.780 variáveis inteiras e 2.628.163 restrições.

No experimento 24, obteve-se a solução ótima com valor igual a zero em 16 minutos, atendendo, assim, às premissas de moagem mínima sem deixar cana bisada. Cabe ressaltar que este tempo de execução inferior ao dos experimentos 1 e 2 da seção anterior era esperado devido à redução do porte do problema com a diminuição de uma frente. A Tabela 34 mostra a análise da moagem e a Tabela 35 analisa a mudança de área das frentes para este experimento.

Analisando a Tabela 34, percebe-se que no caso do transporte, embora a folga tenha variado em alguns macroperíodos, na safra ela se manteve semelhante, em 4%. Já no caso da colheita, a folga foi reduzida em 1% devido ao aumento de tempo das frentes perdido com o deslocamento, como era esperado. Este aumento do deslocamento pode ser visualizado também se comparando a Tabela 35 com a Tabela 31. Apesar de no experimento 22 haver maior número de frentes, no experimento 24 houve quatro mudanças de área a menos que em 22, reduzindo-se, assim, a capacidade de colheita devido à mudança de área das frentes.

Tabela 34: Análise da capacidade (M 1B, E 24, I A7)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	552	610	616	675	633	609	632	501	4.827
<i>% Folga</i>	8%	3%	3%	1%	8%	4%	0%	9%	4%
Colheita									
Total Operação	580	612	612	670	641	610	610	524	4.859
<i>Deslocamento</i>	20,3	18,0	21,6	14,9	16,5	23,9	21,8	24,3	161
<i>Total</i>	600	630	634	684	657	634	632	549	5.020
<i>% Deslococamento</i>	3%	3%	3%	2%	3%	4%	3%	4%	3%
<i>% Folga</i>	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%	1%	1%

Tabela 35: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 24, I A7)

	F1	F2	F3	F4	Total
P1	4	3	3	2	12
P2	2	5	2	4	13
P3	4	1	3	5	13
P4	4	3	2	2	11
P5	0	2	4	6	12
P6	6	6	0	2	14
P7	4	2	5	3	14
P8	3	6	4	1	14
Total	27	28	23	25	103

No experimento 25, também se obteve a solução ótima com valor igual a zero em cerca de 28 minutos, atendendo, assim, às premissas de moagem mínima sem deixar cana bisada. Causa certa surpresa que o tempo computacional seja semelhante ao experimento 22 pelo fato do experimento 25 possuir uma frente adicional e, portanto, maior número de variáveis inteiras. A Tabela 36 mostra a análise de moagem e a Tabela 37 mostra a análise de mudança de frente.

Analisando a Tabela 36, percebe-se que, assim como no experimento 24, no experimento 25 não houve interferência significativa na utilização e folga do transporte. No caso da colheita, o experimento 25 apresenta indicadores de percentual de deslocamento e folga semelhantes ao do experimento 22, contudo estes indicadores são melhores que os apresentados pelo experimento 24. Curiosamente, o experimento 25 apresentou maior número de mudanças de área que os outros dois, embora o percentual de deslocamento tenha sido baixo. Este fato pode ser explicado pelo tempo da mudança ser mais baixo, pois cada frente possui menor número de máquinas para mudar.

Tabela 36: Análise da capacidade (M 1B, E 25, I A8)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	580	616	634	641	613	616	575	552	4.827
<i>% Folga</i>	3%	3%	0%	6%	10%	3%	9%	0%	4%
Colheita									
Total Operação	580	571	620	677	675	620	618	507	4.868
<i>Deslocamento</i>	10,8	14,3	13,6	7,3	8,8	14,1	12,7	9,3	91
<i>Total</i>	591	585	634	684	683	634	630	516	4.959
<i>% Deslococamento</i>	2%	2%	2%	1%	1%	2%	2%	2%	2%
<i>% Folga</i>	1%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	6%	2%

Tabela 37: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 25, I A8)

	F1	F2	F3	F4	Total
P1	4	3	3	2	12
P2	2	5	2	4	13
P3	4	1	3	5	13
P4	4	3	2	2	11
P5	0	2	4	6	12
P6	6	6	0	2	14
P7	4	2	5	3	14
P8	3	6	4	1	14
Total	27	28	23	25	103

Convém notar que, com base nestes resultados, do ponto de vista focado pelo Modelo 1B, cinco aparenta ser a quantidade de frentes de colheita mais adequada, pois penaliza as frentes de colheita de maneira semelhante que com seis frentes. Além disso, a opção com cinco frentes dilui mais os custos fixos das frentes de colheita. Quando comparados os cenários com quatro e cinco frentes, o primeiro possui maior perda de tempo com o deslocamento, embora consiga atender às restrições consideradas. Entretanto, para o dimensionamento do número de frentes de colheita, mais importante, neste caso, que a perda de tempo em mudança são os fatores relacionados aos custos fixos da estrutura da frente e a capacidade de processamento desta estrutura, que fogem ao escopo deste trabalho. A importância desta discussão aumenta em usinas cuja configuração permita que o acréscimo de uma frente aumente sensivelmente o tempo de permanência das frentes nos blocos, em geral usinas com blocos pequenos possuem esta característica.

5.1.5.3 Cenário sem janela de tempo

As janelas de tempo são fundamentais no modelo proposto por representarem características inerentes à área, como os aspectos descritos nas seções 2.5.4, 2.5.5, 2.5.6 e 2.5.7, e restrições relativas ao canavial plantado, descrito na seção 2.3. Estas janelas impedem a colheita dos blocos em determinados macroperíodos de safra, reduzindo os graus de liberdade da programação de colheita. Esta seção visa analisar a influência de se simplesmente suprimir as janelas de tempo, permitindo que o modelo, desta maneira, escolha livremente os melhores momentos para colher as áreas.

O experimento 26 foi baseado nas condições do experimento 22 da seção 5.1.5.1 (instância A5), que possui cinco frentes 22 colhedoras e 24 caminhões, mas sem considerar as restrições de janela de tempo, gerando a instância A9. Após executado, este experimento encontrou a solução ótima com valor igual a zero em um tempo de mais de 6 horas. Como o valor obtido pela função objetivo foi zero, as premissas de moagem foram atendidas, sem remanescer cana bisada. A Tabela 38 mostra a análise da capacidade para este experimento.

Tabela 38: Análise da capacidade (M 1B, E 26, I A10)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	583	624	561	679	606	613	627	534	4.827
<i>% Folga</i>	3%	1%	11%	1%	11%	3%	1%	3%	4%
Colheita									
Total <i>Operação</i>	590	605	571	670	673	616	589	540	4.854
<i>Deslocamento</i>	10,3	8,9	14,5	14,1	11,7	17,3	13,6	12,3	103
<i>Total</i>	600	614	586	684	684	634	602	552	4.956
<i>% Deslococamento</i>	2%	1%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%
<i>% Folga</i>	0%	3%	8%	0%	0%	0%	5%	0%	2%

Analisando a Tabela 38, percebe-se que em termos do percentual de deslocamento, esta solução é bastante similar à do experimento 22, bem como em termos do percentual de folga dos recursos de colheita e transporte. Estas variáveis se alteraram nos experimentos apenas entre macroperíodos, mas o total permanece similar. Foi realizado outro experimento, 27, baseado no experimento 23 da seção 5.1.5.1 (instância A6), que possui cinco frentes 21 colhedoras e 23 caminhões, mas que não resultou em uma solução factível de boa qualidade após cerca de 50 horas de execução. O *Gap* foi de 99,99% para um limitante inferior de 22.522, tendo havido bastante falta de cana. Este limitante inferior indica que esta

configuração com menor quantidade de recursos não possibilita o cumprimento da restrição mínima de moagem e o processamento de toda matéria-prima disponível.

Assim, os experimentos 26 e 27, com as instâncias A9 e A10, respectivamente, demonstram que a flexibilização das janelas de tempo não conduziu, neste caso, uma redução de recursos, como seria desejável com a aplicação do modelo proposto. Entretanto, este fato não descarta a possibilidade de redução de recursos em outras instâncias de dados.

5.1.5.4 Comparação com a setorização

Nesta análise, foi realizada a setorização das frentes de colheita para ter uma base de comparação com o que é praticado no setor. Optou-se por um tipo de setorização mais elaborado do que é praticado no setor e independe do conhecimento da área. Consiste em calcular a capacidade esperada das frentes e agrupar as áreas seguindo a ordem da distância entre o bloco e a usina, até que se complete sua capacidade. Este método pode ser considerado mais elaborado, pois já trata de maneira aproximada a capacidade da frente e o raio médio. Na prática das usinas, observa-se que a setorização se baseia na repetição do que aconteceu na safra anterior, que não necessariamente atende a estes critérios. A limitação deste tipo de setorização acontece quando há grandes espaços sem áreas contíguas dentro de uma faixa de distância, ou há alguma barreira natural separando a área da usina. No caso da Empresa A, o segundo fator não se aplica e o primeiro não parece ser relevante.

Este experimento, 28, foi baseado no experimento 22 da seção 5.1.5.1 (instância A5), que possui cinco frentes 22 colhedoras e 24 caminhões. Na média, as frentes de cinco máquinas colheram cerca de 500 mil toneladas e as de quatro, cerca de 400 mil. Assim, a setorização ficou da seguinte forma: à frente 1 foram atribuídas as áreas entre 1 e 7 km; à frente 2, entre 7 e 16 km; à frente 3, entre 16 e 30 km; à frente 4, entre 30 e 40 km e à frente 5 entre 40 e 48 km. Este processo de setorização gerou a instância A11 que é resolvida neste experimento.

O experimento 28 rodou cerca de 26 horas e chegou a uma resposta final com um *Gap* de 34%. Não houve falta de cana para a moagem, mas houve cerca de 12.000 toneladas de cana bisada. Dessa forma, não se pode dizer que a solução seja ruim, mas a qualidade da solução do experimento 22 foi superior e em um tempo computacional menor. A Tabela 39 mostra a análise da moagem, a Tabela 40 mostra a análise da capacidade e a Tabela 41 apresenta a análise da mudança de área das frentes.

Tabela 39: Análise da moagem (M 1B, E 28, I A11)

Macroperíodo	Produção (t)	Moagem Mínima (t)	Acima da moagem mínima (t)	Moagem Máxima (t)	Abaixo da moagem máxima (t)
P1	257.253	257.253	0	267.753	10.500
P2	279.247	271.144	8.103	282.211	2.964
P3	271.659	271.659	0	282.747	11.088
P4	293.474	293.474	0	305.452	11.978
P5	305.452	293.474	11.979	305.452	0
P6	282.747	271.659	11.088	282.747	0
P7	271.144	271.144	0	282.211	11.067
P8	236.672	236.672	0	246.332	9.660
Total Geral	2.197.648	2.166.478	31.170	2.254.906	57.258

Avaliando a Tabela 39, percebe-se que em cinco macroperíodos foi possível atender apenas ao mínimo de moagem e em dois outros, o máximo foi o limitante. Já observando Tabela 40, percebe-se que em termos dos recursos de transporte e colheita, o experimento 28 apresentou resultado equivalente ao experimento 22, ligeiramente superior por ter transportado menos matéria-prima (vide Tabela 30). Entretanto, ao analisar a Tabela 41, verifica-se um número bem maior de mudanças de frente no experimento 28, 14 mudanças adicionais.

Tabela 40: Análise da capacidade (M 1B, E 28, I A11)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	569	631	599	626	674	626	562	509	4.796
<i>% Folga</i>	5%	0%	5%	9%	2%	1%	11%	8%	5%
Colheita									
Total <i>Operação</i>	563	583	593	650	667	612	607	520	4.796
<i>Deslocamento</i>	7,0	14,0	8,6	12,5	11,5	12,9	11,7	10,5	89
<i>Total</i>	570	597	602	662	679	625	619	531	4.884
<i>% Deslococamento</i>	1%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
<i>% Folga</i>	5%	6%	5%	3%	1%	1%	2%	4%	3%

Tabela 41: Análise de mudança das frentes (M 1B, E 28, I A11)

	F1	F2	F3	F4	F5	Total
P1	2	4	2	1	1	10
P2	3	7	3	4	0	17
P3	4	4	1	1	2	12
P4	3	6	2	4	1	16
P5	2	3	2	3	4	14
P6	5	6	3	2	1	17
P7	4	3	4	2	1	14
P8	4	7	0	1	1	13
Total	27	40	17	18	11	113

Outro experimento, 29, foi feito utilizando as premissas do experimento 28 (instância A11), mas considerando os blocos iguais em termos de potencial de colheita, bem como desconsiderando a perda de tempo com mudança de área das frentes de colheita. Este cenário gerou a instância A12 e se aproxima mais do que é praticado no mercado atualmente. A Tabela 42 mostra a análise de capacidade para o experimento 29 e utiliza os potenciais diferenciados de cada bloco.

Analisando-se a Tabela 42, percebe-se o desbalanceamento nos recursos de colheita, sobrando recurso em P8 e faltando em P2, P3 e P7. Em P2, 17 horas utilizadas do recurso excederam o tempo disponível, em P3, este valor foi de 68 horas e em P7, de 98 horas. No total, 183 horas adicionais na safra seriam necessárias para que os recursos produzissem a quantidade planejada. Pode-se dizer que neste período houve falta de cana na moenda devido à capacidade de colheita. Se em média uma colhedora produzir 35 toneladas por hora, na safra teria havido cerca 6.500 toneladas perdidas, e a um custo de R\$144 por tonelada, seria obtido um custo total de cerca de R\$920 mil.

Tabela 42: Análise da capacidade (M 1B, E 29, I A12)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
Disponível	600	632	634	684	684	634	632	552	5.053
Transporte	592	596	610	669	638	593	601	528	4.827
<i>% Folga</i>	1%	6%	4%	2%	7%	6%	5%	4%	4%
Colheita									
Total Operação	542	633	691	654	636	592	715	437	4.899
<i>Deslocamento</i>	9,1	16,3	10,4	12,3	12,8	14,9	16,1	7,1	99
<i>Total</i>	551	650	701	666	649	607	731	444	4.998
<i>% Deslococamento</i>	2%	3%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
<i>% Folga</i>	8%	-3%	-11%	3%	5%	4%	-16%	20%	1%

Dessa forma, a setorização estudada nesta seção tem características elaboradas que levam em consideração de antemão a capacidade de colheita média e a capacidade de transporte. Isso contrasta com o método típico do setor, que utiliza para o ano seguinte a frente que colheu a área no ano anterior. Mesmo assim, a solução obtida pela setorização por meio do experimento 28, apesar de ser boa, não pode ser considerada melhor que a obtida pelo experimento 22, tanto por deixar bisar cana, quanto por aumentar o número de mudança de frentes. Já o experimento 29 deixa mais evidente o prejuízo causado por considerar os potenciais de produção homogêneos, causando prejuízos da ordem de R\$920 mil para o caso estudado.

5.2 Empresa B

A Usina B está localizada em região canavieira tradicional do estado de São Paulo, e sua fundação aconteceu em mais de 10 anos. Possui para a safra 2013/2014 uma moagem de 16.320 t/dia com 15.320 t/dia proveniente de operação própria e 1.000 t/dia de fornecedores. Da operação própria, 11.130 t/dia são provenientes de colheita mecanizada e 3.660 t/dia provenientes de colheita manual. Na safra, são processados 2.720.000 toneladas de matéria-prima própria, sendo que 727.968 toneladas devem ser colhidas manualmente e 1.992.032 toneladas colhidas mecanicamente. Em termos de estrutura fundiária, existem grandes fazendas, mas também há áreas pequenas. A topografia é caracterizada por suaves ondulações, mas também há áreas declivosas, impondo a necessidade de haver colheita manual. Estes dois fatores configuram uma característica distinta da Empresa A, e mais complexa.

Nesta unidade vem sendo realizado um trabalho de consultoria há mais de oito anos com foco na logística de colheita e transporte. Diversas visitas foram realizadas no final de 2012 e início de 2013 nesta usina, em que foram levantados os dados desta unidade, tais como informações criteriosas de previsões para a safra 2013/2014, sobre a capacidade de moagem, a meta de irrigação, a quantidade de matéria-prima por área, a definição de áreas de fornecedor, o período de colheita (precoce, média ou tardia), a data da última colheita, as coordenadas geográficas da área, o tipo de colheita da área, a possibilidade de irrigação da área, o potencial de transporte, a disponibilidade de tempo dos recursos e a quantidade de recursos. Também, foram levantadas informações sobre a capacidade de colheita, como tiros de colheita, tempos de manobra e velocidade da colhedora.

Os potenciais de colheita e transporte foram obtidos com base em um levantamento dos parâmetros mostrados anteriormente pela equipe de colheita e transporte. A quantidade de matéria-prima foi levantada com base em estimativa obtida a campo pela equipe técnica por volta de fevereiro de 2013. A disponibilidade de tempo dos recursos foi levantada por meio de discussão com a equipe operacional, com o apoio da Empresa α . A capacidade de moagem foi informada por meio do plano agroindustrial da companhia. As metas de irrigação com vinhaça foram informadas pela equipe industrial com a análise da área agrícola. A quantidade de recursos foi calculada por meio de simuladores determinísticos baseados nas sugestões de cálculo das seções 2.2.3.1 e 2.2.4.3.

A seção 5.2.1 mostra o resultado da agregação de blocos, que é o primeiro passo para o tratamento dos dados. A seção 5.2.2 discute os dados de entrada para o modelo,

agrupados por bloco agregado, e, por fim, a seção 5.2.3, mostra os experimentos computacionais realizados com os Modelos 1B, já que foi o mais bem sucedido e flexível no estudo de caso da Empresa A.

5.2.1 Agregação dos blocos

A Empresa B trabalha com talhões de colheita como unidade de área. Assim, este procedimento transforma os talhões em blocos agregados de colheita. Sem o procedimento de agregação, o problema envolveria 6.260 talhões, nove frentes de colheita, oito macroperíodos e seis microperíodos dentro de cada macroperíodo, resultando em 2.704.320 variáveis inteiras (y_{tjs}). Assim, primeiramente decidiu-se tornar o problema mais tratável, aplicando as técnicas para agregar os blocos de colheita, conforme discutido adiante. Com isso, foi possível reduzir os 6.260 talhões originais para 183 blocos agregados, resultando em 79.056 variáveis inteiras e 17.063.303 restrições, ainda assim, um modelo de porte muito grande. Note que este problema é bem maior do que o problema da Empresa A, com pouco mais de 30 mil variáveis inteiras e pouco mais de 3 milhões de restrições.

Assim como no caso da Empresa A, para a Empresa B foram levados em conta dois critérios básicos para a agregação dos talhões: o macroperíodo e o espaço. No estudo, nove padrões foram detectados, conforme mostra a Tabela 43. Os padrões foram calculados seguindo alguns critérios da equipe agrícola, são eles: a cana bisada do ano anterior seria colhida no máximo no segundo macroperíodo, as áreas de plantio teriam flexibilidade para plantar em qualquer época do ano e as áreas já plantadas teriam uma flexibilidade para colher as áreas de 11 a 13 meses.

Tabela 43: Padrões de período (I B1)

Padrão	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	1	1	1	1	0	0
6	0	0	0	1	1	1	0	0
7	0	0	0	0	1	1	1	0
8	0	0	0	0	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	1	1

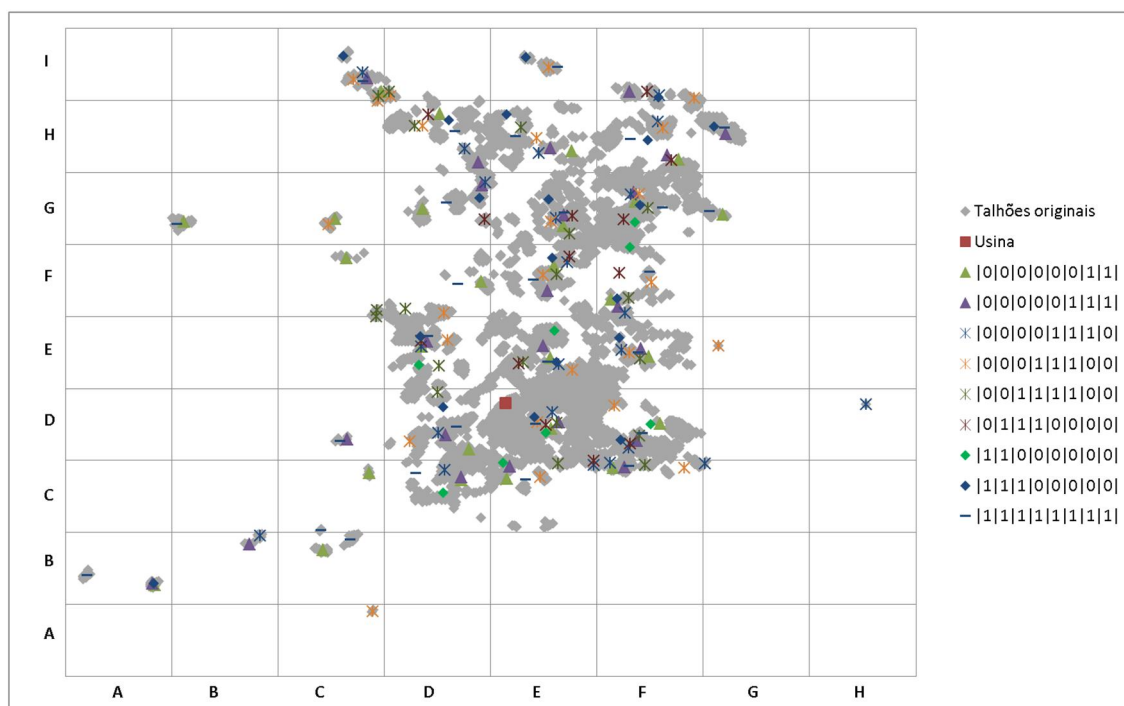
O padrão 1 refere-se às áreas ainda a serem plantadas. Os padrões 2 e 3 são de áreas plantadas com variedades precoces. Os padrões 4, 5, 6 e 7 são de áreas plantadas com variedades médias e os padrões 8 e 9 são de áreas plantadas com variedades precoces. Cabe

ressaltar que o padrão $|1|1|1|1|1|1|1|1|$ é aquele que possui maior grau de liberdade para encaixar a programação da área em qualquer período, podendo, assim, atuar como fator de equilíbrio das capacidades de colheita e transporte.

No caso do espaço, a área operacional da usina foi separada em reticulados de 10 km. A área operacional da usina compreende um quadrado de 73 km de largura e 117 km de altura. A agregação foi feita por meio da união dos padrões de período dentro de cada quadrícula. O Gráfico 26 mostra a distribuição geográfica dos talhões originais e dos blocos. As coordenadas originais foram substituídas para preservar a localização da usina, que está na quadrícula ED (X=E e Y=D). As unidades de área originais, neste caso talhões, estão em cor cinza. No caso dos blocos agregados, cada tipo de marcador representa um tipo de variedade que pode compreender mais de um padrão temporal (precoce, média, tardia e plantio). As cores dos blocos agregados distinguem os diferentes padrões pertencentes a um mesmo tipo de variedade.

Analisando-se o Gráfico 26, percebe-se significativa redução na quantidade de unidade de área. Observa-se também grandes concentrações de área (X=D a F e Y=C a H) e alguns blocos dispersos, como os que estão na quadrícula HD, por exemplo.

Gráfico 26: Distribuição geográfica dos blocos de colheita (I B1)



5.2.2 Dados de entrada

Assim como no caso da Empresa A, os dados de entrada foram estruturados em uma tabela de *Excel* 2003. O agrupamento destes dados foi utilizado nos Modelos 1B e denominado instância B1 (I B1). Os dados relacionados aos blocos de colheita podem ser visualizados no Apêndice C.

Para a Empresa B, a colheita é feita por nove frentes, sendo seis de colheita mecanizada (três com quatro colhedoras e três com três) e três de colheita manual (todas com três carregadoras). Descontadas as horas paradas por manutenção, abastecimento, troca de turno, horário de refeição e outras paradas operacionais, as colhedoras devem trabalhar 12 horas por dia e as carregadoras com 13 horas, segundo a meta adotada pela empresa para a safra. O mesmo vale para as horas trabalhadas dos caminhões que foi definida pela empresa por 16,6 horas trabalhadas como meta.

Para ser mais fácil a visualização das características dos blocos, a Tabela 44 mostra sua estatística descritiva básica. O Gráfico 27 complementa esta caracterização, apresentando um histograma do tamanho dos blocos de colheita manual e o Gráfico 28 mostra este histograma para os blocos de colheita mecanizada. Já o Gráfico 29 mostra o histograma do potencial de colheita mecanizada, o Gráfico 30(a) mostra o potencial de transporte para a colheita manual e o Gráfico 30(b) mostra o potencial de transporte para a colheita mecanizada.

Tabela 44: Estatística descritiva das características dos blocos agregados (I B1)

	Bloco (t)		Transp. (t/h)		Col. (t/h)
	man	mec	man	mec	mec
<i>mínimo</i>	247	1.012	7,1	9,9	32,4
<i>mediana</i>	3.567	8.306	13,9	23,7	46,4
<i>média</i>	5.164	13.646	14,3	24,3	48,7
<i>máximo</i>	36.102	84.312	28,8	48,9	75,2
<i>Contagem</i>	141	146	141	146	146

Primeiramente, cabe ressaltar que a quantidade total de blocos não é a soma da contagem de blocos de colheita manual e mecanizada apresentados na Tabela 44, pois se optou por blocos com uma fração manual e outra mecanizada. Com isso, foi possível reduzir a quantidade total de blocos e, conseqüentemente, diminuir o porte do problema, já que as frentes de colheita são apenas de um tipo e elas podem colher no máximo o percentual da área que possuem seu tipo de colheita, vide restrições (68).

Gráfico 27: Histograma do tamanho do bloco de colheita manual (I B1)

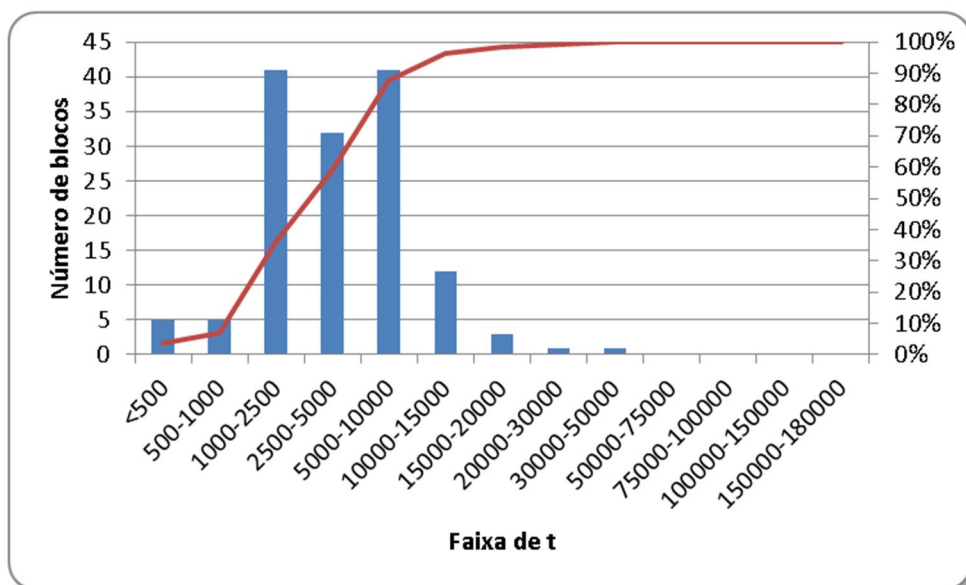
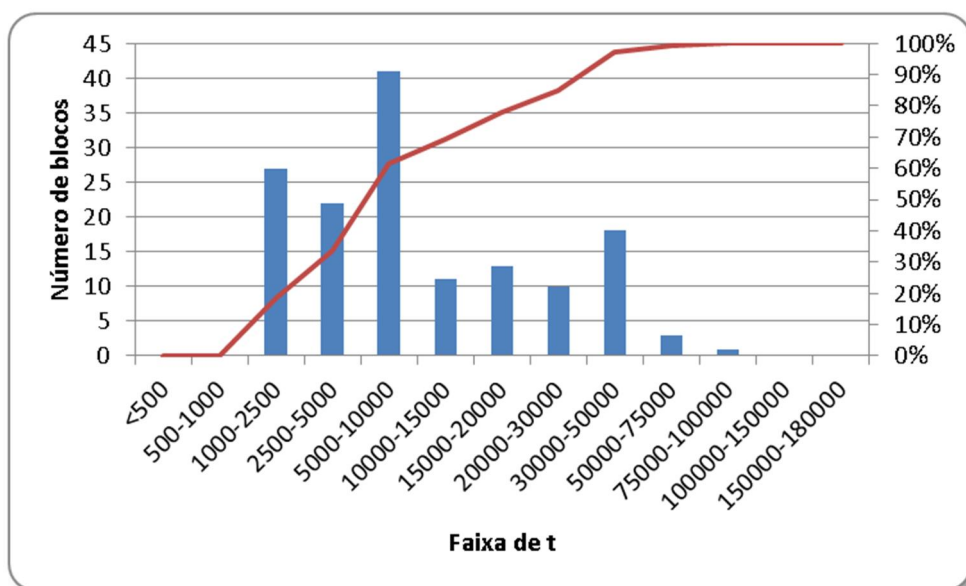


Gráfico 28: Histograma do tamanho do bloco de colheita mecanizada (I B1)



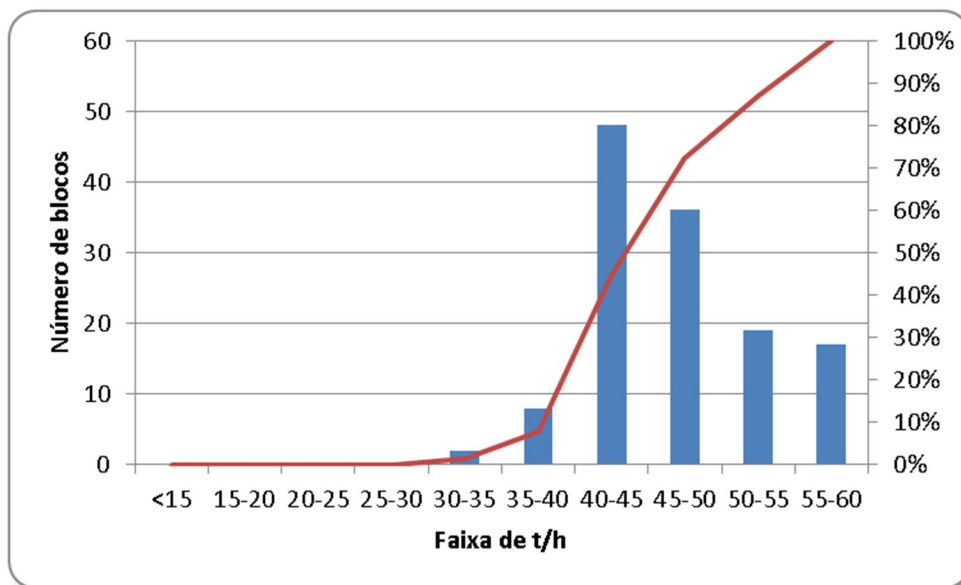
Analisando o tamanho do bloco na Tabela 44, no Gráfico 27 e no Gráfico 28, percebe-se uma grande diferença entre os blocos de colheita manual e mecanizada, sendo os de colheita mecanizada maiores que os do outro tipo. Também cabe ressaltar que o tamanho dos blocos da Empresa B é muito menor que os da Empresa A. Os histogramas mostram que a quantidade de blocos com produção inferior a 2.500 toneladas é cerca de 40% na colheita

manual e 20% na colheita mecanizada. Por outro lado, os blocos grandes, superiores a 15.000 toneladas, representam cerca 1% das áreas de colheita manual e 30% de mecanizada.

Diferentemente da Empresa A, esta característica descrita anteriormente para a Empresa B aumenta a complexidade para a obtenção de uma boa solução para o problema, pois aumenta a necessidade de mudanças de área das frentes de colheita, devido aos pequenos tempos de permanência nas áreas. Como forma de aumentar o tempo de permanência da frente na área, esta usina possui maior quantidade de frentes de colheita com um menor número de equipamentos e, conseqüentemente, menor capacidade de colheita.

Quanto ao potencial de colheita mecanizada, ele foi considerado variável, conforme abordado para a Empresa A e apresentado na seção 2.2.3.1. Já o potencial de colheita manual foi considerado constante para todas as áreas manuais, pois sua variação não foi considerada significativa para as condições da Empresa B. Ao analisar o potencial de colheita da Empresa B na Tabela 44 e no Gráfico 29, percebe-se uma dispersão menor que a da Empresa A, com potenciais mais altos, possivelmente explicados por melhores produtividades, já que está situada em regiões de solos mais férteis.

Gráfico 29: Histograma do potencial de colheita mecanizada (I B1)

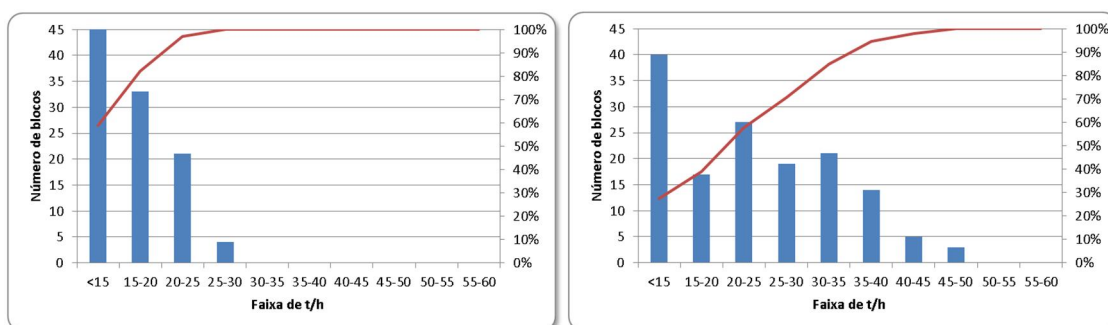


Para o caso de uma colhedora trabalhando 12 horas por dia, sua produção varia de 390 a 900 toneladas por dia. Para uma produção de 11.130 toneladas por dia de colheita mecanizada, se todas as colhedoras estiverem em uma condição de produção mínima, são necessárias 29 unidades, todavia, na melhor condição, seriam necessárias apenas 13. Na

condição média são necessárias 19 colhedoras, sendo que a usina dispõe de 21 no total de suas frentes.

Similarmente à colheita, analisando o potencial de transporte na Tabela 44, no Gráfico 30(a) e no Gráfico 30(b), percebe-se uma dispersão maior que o potencial de colheita, em especial no caso da colheita mecanizada, variando entre 7 e 30 toneladas por hora para a colheita manual e 10 e 50 para a colheita mecanizada. Percebe-se claramente que o menor potencial da colheita manual é, provavelmente, explicado por sua menor capacidade de carga quando comparado com a colheita mecanizada.

Gráfico 30: Histograma do potencial de transporte: (a) manual, (b) mecanizado (I B1)

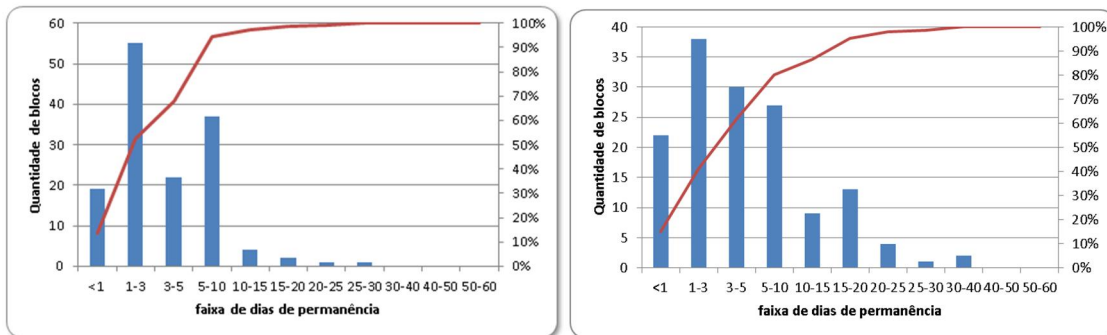


Para o caso de um caminhão da colheita mecanizada trabalhando 16,6 horas por dia, sua produção varia de 164 a 811 toneladas por dia. Para uma produção de 11.130 toneladas por dia, se todos os caminhões estivessem em uma condição de produção mínima, seriam necessárias 68 unidades. Na melhor condição, seriam necessárias apenas 14. Já para a colheita manual, trabalhando 16,6 horas por dia, sua produção varia de 118 a 477 toneladas por dia. Para uma produção de 3.660 toneladas por dia, se todos os caminhões estivessem em uma condição de produção mínima, seriam necessárias 38 unidades. Na melhor condição, seriam necessárias apenas oito. Na condição média, são necessários 28 caminhões para a colheita mecanizada e 16 para a colheita manual, ou seja, 44 caminhões no total, sendo que a usina dispõe de 60 no total.

O Gráfico 31(a) e (b) mostra o tempo de permanência em cada bloco de uma frente de colheita para as frentes manuais e mecanizadas, respectivamente. No caso das frentes manuais, foram consideradas três carregadoras e quatro colhedoras para as frentes mecanizadas. Cabe ressaltar que uma frente com quatro colhedoras é o cenário com maior número de deslocamento das frentes, portanto mais crítico para os modelos estudados no caso da Empresa B. Neste cenário, o valor mínimo de permanência é de 0,2 e 0,5 dias para as

colheitas manual e mecanizada, respectivamente, a mediana é de 2,9 e 3,9 dias, a média de 4,2 e 6,4, bem como o máximo de 29,6 e 39,8. O Gráfico 31 (a) e (b) mostra que o tempo inferior a um dia é maior que 10% dos blocos em ambos os tipos de colheita. Em cerca de 50% dos blocos de colheita manual, este tempo é inferior a três dias e, no caso da colheita mecanizada, este valor é de 41% dos blocos.

Gráfico 31: Histograma do tempo de permanência das frentes: (a) manuais, (b) mecanizadas (I B1)



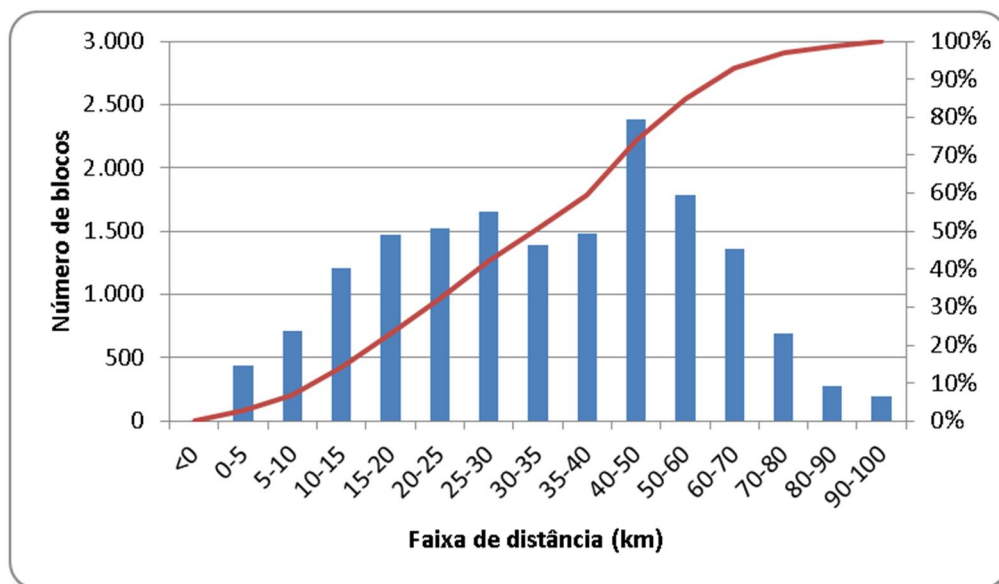
Sendo assim, a quantidade de microperíodos adotados para esta instância de dados foi de sete por frente em um período mensal. Isto equivale a uma mudança de área da frente de colheita a cada 4,2 dias. Como a quantidade de blocos e o número de frentes é bem maior para esta instância de dados, optou-se por não acrescentar mais subperíodos, dando a folga que houve no caso da Empresa A. Esta definição é crítica para estabelecer o porte do modelo e, pelos dados apresentados, é bastante razoável pelo fato de três dias de permanência da frente no bloco estar abaixo da média e da mediana.

As distâncias entre blocos foram estimadas com base na distância Euclidiana entre suas coordenadas (vide seção 4.2.1 para o cálculo das coordenadas do bloco agregado). Estas distâncias Euclidianas, foram corrigidas por um percentual de 30%. O Gráfico 32 mostra o histograma da distância de deslocamento entre os blocos de colheita. Como este deslocamento forma uma matriz simétrica, foi considerado apenas um lado da matriz e excluiu-se a diagonal, que possui apenas valores iguais a zero.

Observando-se o Gráfico 32 percebe-se que cerca de 50% dos dados possuem deslocamentos inferiores a 35 quilômetros. Estes deslocamentos são aqueles que causam menor impacto na capacidade de colheita das frentes, pois tomariam menos tempo delas. Há outra concentração de dados com distâncias entre 35 e 70 quilômetros, que representariam

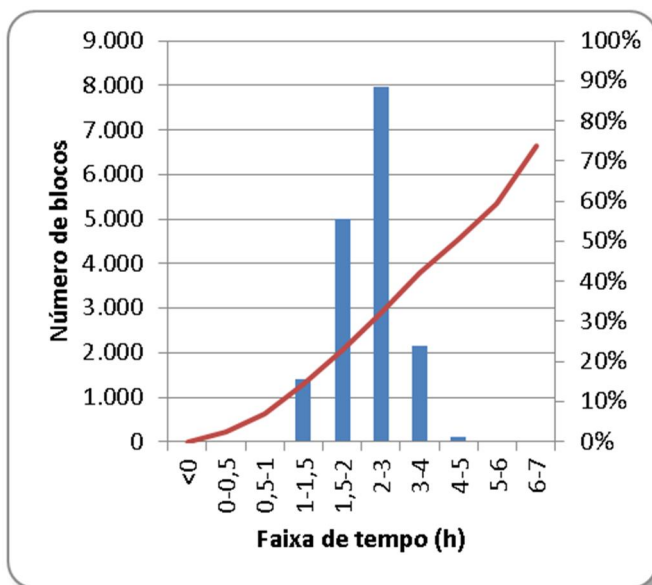
deslocamentos mais custosos em tempo para a capacidade de colheita das frentes. Cabe ressaltar que este histograma é bastante semelhante ao da Empresa A.

Gráfico 32: Histograma da distância de deslocamento entre os blocos (I B1)



Assim como na seção 5.1.2 para a Empresa A, a partir das distâncias entre os blocos foi calculado o tempo de deslocamento, estimando-se uma velocidade de 40 quilômetros por hora dos veículos de transporte para ida, um tempo de embarque e desembarque das colhedoras de 30 minutos, bem como uma eficiência de 85% nesta operação. Assim, o Gráfico 33 mostra o histograma do tempo de deslocamento entre blocos de colheita.

Por fim, a Tabela 45 mostra os parâmetros analisados por macroperíodo. Para a safra foram definidos oito macroperíodos relacionados ao mês com turnos de 24 horas. A capacidade se refere às horas disponíveis às frentes de colheita e ao transporte, levando-se em conta os dias efetivos de safra, ou seja, é descontado o tempo esperado de parada da usina para manutenção. Cabe ressaltar que as quebras por manutenção e demais paradas específicas das colhedoras estão sendo consideradas nas 12 horas trabalhadas. O mesmo acontece com os caminhões em relação às 16,6 horas trabalhadas. Já a demanda esperada é calculada considerando-se as horas disponíveis no macroperíodo e a moagem horária, que, no caso de 11.130 toneladas por dia de colheita mecanizada e 3.660 toneladas por dia de colheita manual. As demandas mínimas e máximas foram calculadas para o caso do Modelo 1B, com uma margem de 2% acima ou abaixo da moagem esperada.

Gráfico 33: Histograma do tempo de deslocamento entre os blocos (I B1)**Tabela 45: Definição de parâmetros por macroperíodo (I B1)**

Período	Capacidade (h)	Demanda mínima (t)		Demanda máxima (t)		Demanda esperada (t)		Área (ha)
		man	mec	man	mec	man	mec	
		P1	440	73.277	201.210	76.267	209.422	
P2	584	97.304	268.097	101.275	279.040	99.290	273.569	488
P3	605	100.760	277.583	104.872	288.913	102.816	283.248	505
P4	632	105.358	290.202	109.658	302.046	107.508	296.124	528
P5	647	107.837	297.050	112.238	309.175	110.038	303.113	541
P6	619	103.159	284.192	107.369	295.792	105.264	289.992	517
P7	640	106.598	293.627	110.948	305.611	108.773	299.619	535
P8	115	19.117	40.231	19.898	41.874	19.508	41.052	79

Conhecendo-se as demandas de moagem por macroperíodo e conhecendo a quantidade de matéria-prima por padrão temporal, é possível fazer um balanceamento prévio para identificar infactibilidade na resolução dos modelos propostos. Na Tabela 46 foi analisada a viabilidade da colheita manual atender às restrições de moagem, semelhante à que foi feita para a Empresa A na Tabela 21. Primeiro atendeu-se os primeiros macroperíodos com os padrões temporais mais precoces, depois os médios e os tardios. Se em algum período faltou matéria-prima, utilizou-se o padrão referente às áreas a serem plantadas. O mesmo foi feito para a colheita mecanizada na Tabela 47. Analisando-se estas tabelas, percebe-se que há viabilidade em termos de balanceamento entre moagem e matéria-prima disponível levando em conta os padrões temporais. Além disso, as áreas a serem plantadas devem suprir falta de

matéria-prima média e tardia para a colheita manual e média para a colheita mecanizada. Cenário bastante distinto da Empresa A.

Tabela 46: Balanceamento preliminar da colheita manual (I B1)

	Manual	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total	
	<i>Demanda (t)</i>	73.277	97.304	100.760	105.358	107.837	103.159	106.598	19.117	713.408	
Padrão	<i>Oferta (t)</i>										<i>Sobra</i>
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	169.758		31.141	23.428	6.735	30.429	9.004	35.238	19.117	155.093	14.666
1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	8.085	8.085								8.085	0
1 1 1 0 0 0 0 0 0 0	80.543	65.192	15.351							80.543	0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 0	50.812		50.812							50.812	0
0 0 1 1 1 1 0 0 0 0	77.332			77.332						77.332	0
0 0 0 1 1 1 0 0 0 0	98.622				98.622					98.622	0
0 0 0 0 1 1 1 0 0 0	77.408					77.408				77.408	0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0	94.155						94.155			94.155	0
0 0 0 0 0 0 1 1 1 1	71.359							71.359		71.359	0
Total	728.074	73.277	97.304	100.760	105.358	107.837	103.159	106.598	19.117	713.408	14.666

Tabela 47: Balanceamento preliminar da colheita mecanizada (I B1)

	Mecanizada	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total	
	<i>Demanda (t)</i>	201.210	268.097	277.583	290.202	297.050	284.192	293.627	40.231	1.952.192	
Padrão	<i>Oferta (t)</i>										<i>Sobra</i>
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	463.831		19.974	100.503	73.561	120.690	92.865		16.049	423.642	40.189
1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	89.580	89.580								89.580	0
1 1 1 0 0 0 0 0 0 0	220.692	111.629	109.063							220.692	0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 0	139.060		139.060							139.060	0
0 0 1 1 1 1 0 0 0 0	177.080			177.080						177.080	0
0 0 0 1 1 1 0 0 0 0	216.640				216.640					216.640	0
0 0 0 0 1 1 1 0 0 0	176.360					176.360				176.360	0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0	191.327						191.327			191.327	0
0 0 0 0 0 0 1 1 1 1	317.809							293.627	24.183	317.809	0
Total	1.992.381	201.210	268.097	277.583	290.202	297.050	284.192	293.627	40.231	1.952.192	40.189

5.2.3 Implementação computacional e experimentos

Como o Modelo 1B foi o mais bem sucedido para a Empresa A, ele foi utilizado no GAMS versão 24.1.3 com o *solver* CPLEX 12.5.1.0 utilizando a instância B1 em um computador de alto desempenho do laboratório do GPO do DEP-UFSscar, o GPO-Zeus (processador Intel i7-3770 com oito núcleos e 16GB de memória RAM). Convém lembrar que essa instância é muito grande, com cerca de 80 mil variáveis inteiras e 17 milhões de restrições.

A Tabela 48 mostra os experimentos realizados com o Modelo 1B para a instância B1. Para esta instância, as estratégias mais bem sucedidas para a instância A1 foram testadas para este caso. Os experimentos de 1 a 4 utilizaram o modelo matemático com tempo

máximo de execução, variando-se os parâmetros que apresentaram maior interferência no caso da instância A1 (*RINS* e *Local Branching*). Nos experimentos 5 e 6, foi utilizada apenas a heurística construtiva do tipo *relax-and-fix*. Por fim, o experimento 7 utilizou a heurística construtiva e a de melhoria com *fix-and-optimize*.

Entretanto, nenhum resultado provou ser a solução ótima. O melhor dentre eles foi obtido sem a utilização das heurísticas e com o tempo limite de 52.200 segundos. Surpreendentemente, quando se aumentou o tempo de execução, foi obtida uma solução com pior qualidade. Apesar de ter sido o experimento 1 o mais bem sucedido, não pode ser considerada uma boa solução, pois não atendeu à restrição de moagem mínima, apresentando alto valor de falta de cana. Os experimentos 7 e 6, apresentaram o segundo e terceiro melhores resultados, respectivamente, todavia com significativa diferença entre elas. Foi realizado, então, um experimento com os dados da instância B1 no Modelo 1B relaxado, para verificar a qualidade do limitante inferior da função objetivo. Ainda assim, o valor da função objetivo foi de 12.174.420, também implicando em muita cana bisada e falta de cana.

Uma dúvida que surgiu neste ponto da pesquisa foi se a quantidade de microperíodos não estaria gerando a falta de cana, devido à falta de opção da frente colher mais blocos em um determinado macroperíodo. Assim, outros testes com o modelo relaxado foram feitos aumentando o número de microperíodos. No entanto, com 10 microperíodos, o CPLEX não conseguiu gerar uma solução em tempos razoáveis. Mais testes poderiam ser feitos para verificar se algum tipo de modificação nas heurísticas ou na estrutura do modelo poderia aprimorar a qualidade da solução, mas como estes testes tomam tempo e o prazo para a conclusão da tese estava curto neste ponto da pesquisa, optou-se por explorar mais os resultados da Empresa A. Cabe lembrar que os últimos dados fornecidos foram disponibilizados no final de dezembro de 2013.

Tabela 48: Experimentos computacionais com o Modelo 1B (M 1B, I B1)

Experimentos	Resultados			Parâmetros CPLEX						Contrutiva (Relax&Fix)				Melhoria (Fix&Optimize)			Modelo				
	Valor da função objetivo	Gap (%)	Tempo de execução	RINS	Feasibility Pump	Local Branching	Presolve	Cortes	ênfase	reslim	Temporal	Forward	Backward	Frente	Overlapping	reslim	Bloco	Temporal (forward)	Overlapping	reslim	Var z
1	78.261.772	0,84	14:38:28				X	X	auto.	52.200											Real
2	152.603.890	0,92	14:37:34	X			X	X	auto.	52.200											Real
3	152.603.890	0,92	14:37:19	X		X	X	X	auto.	52.200											Real
4	152.603.890	0,92	50:07:01				X	X	auto.	180.000											Real
5	153.161.305	0,92	25:27:49				X	X	auto.		X	X			10800						Real
6	98.413.791	0,88	28:24:53				X	X	auto.		X	X			10800						Real
7	90.542.291	0,87	29:01:40				X	X	auto.		X	X		X	10800		X	X	21600		Real

5.3 Comparação dos estudos de caso

Conforme verificado na seção 5.1.3.3, o Modelo 1B foi capaz de gerar boas soluções para a instância A1 composta por dados obtidos da Empresa A. Neste caso, embora a função objetivo fosse diferente de zero, ou seja, houve cana bisada ou falta de cana para a moagem, ocorreu apenas o primeiro caso e em pequena quantidade. Dentre estas boas soluções tanto o modelo puro com limitação de tempo, como as heurísticas construtivas e de melhoria, com tempos aproximadamente iguais, chegaram a resultados similares. Para várias instâncias resolvidas na seção 5.1.5, como A4, A5, A7, A8, A9, A11 e A12, foi obtida a solução ótima igual a zero em tempo aceitável.

Entretanto, para a instância B1, composta por dados da Empresa B, de porte bem maior do que o das instâncias da Empresa A, o Modelo 1B não foi capaz de gerar soluções com boa qualidade. Esta diferença nos resultados obtidos pode ser explicada pela diferente complexidade das duas empresas, em termos de estrutura fundiária e nível de mecanização, bem como de diversidade de janelas de tempo de áreas próximas. Estes fatores geraram para a Empresa B um número maior de blocos e frentes de colheita, aumentando o porte do problema, cuja moagem na safra não é tão maior que a Empresa A.

De um lado, pode-se vislumbrar no futuro que as áreas não mecanizadas terão menor perspectiva de existência no longo prazo, devido às leis ambientais que obrigam a colheita crua, tornando a colheita manual muito mais custosa. Sendo assim, empresas com características mais semelhantes às da Empresa A tendem a ter maior participação na composição do setor em cenários futuros. Por outro lado, a divisão ou concentração das propriedades é algo mais difícil de prever no longo prazo. Se houver tendência de divisão, usinas com características à Empresa B tenderão a ter maior participação na composição do setor, já no caso da tendência ser concentração, o cenário se inverte.

Assim, os estudos de caso apresentados nesta seção nos permitem inferir que a aplicabilidade do Modelo 1B é maior para o caso de usinas com o porte das estudadas neste trabalho, bem como de usinas com colheita mecanizada em áreas grandes e áreas pouco fragmentadas em termos de padrões temporais. Vislumbram-se também oportunidades de pesquisa futura para a busca de soluções de problemas com porte igual ao da Usina B.

6 Processo de validação

Para o processo de validação é resgatado o tetraedro proposto na metodologia de Oral e Kettani (1993), discutido na seção 3.4, que é útil para classificar os tipos de problemas de pesquisa operacional, relacionando-os com suas facetas, vide Figura 23.

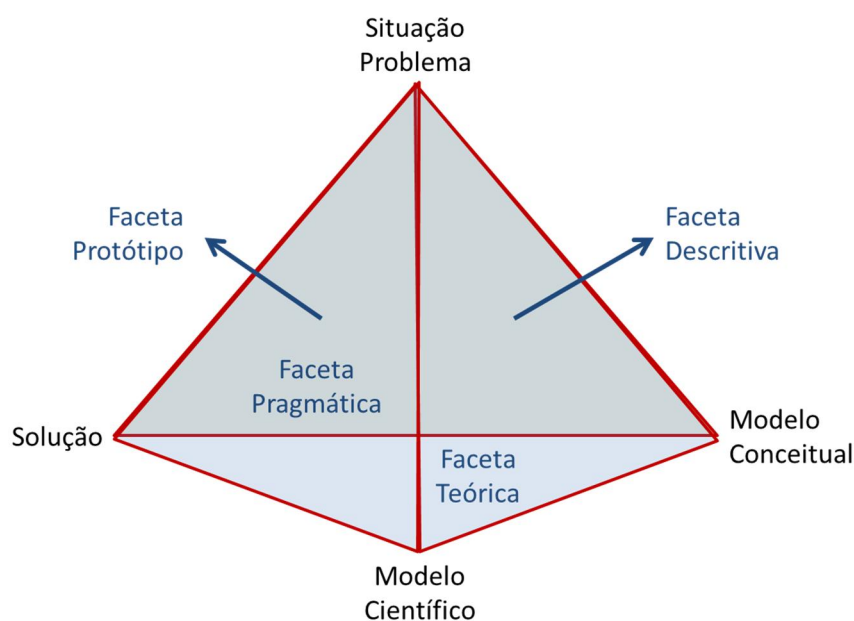


Figura 23: Tetraedro para a validação de modelos

Fonte: Adaptado de Oral e Kettani (1993)

Nesta tese não foi possível testar os modelos e métodos propostos, bem como as soluções obtidas em uma usina, e observar suas vantagens e desvantagens ao longo do tempo. Os estudos de caso se limitaram à obtenção de dados reais das usinas (Empresas A e B), devido ao prazo para o desenvolvimento da tese, ficando esta questão remanescente para estudos futuros. Desta forma, a validação de face, necessária para a faceta pragmática, seria possível apenas se os contatos na Empresa A durante o levantamento de dados tivessem permanecido, ou alguns dos modelos e métodos propostos tivessem obtido boas soluções para a Empresa B. Assim, embora haja certa interação entre a solução e o modelo conceitual, bem como a solução e o modelo científico, a interação entre a solução e a situação problema ficou comprometida. A faceta protótipo não se mostra relevante para este estudo, pois neste trabalho existiu um grande esforço de adaptação do modelo conhecido na literatura de dimensionamento e sequenciamento de lotes para um que represente o modelo conceitual descrito na seção 2.7. Dessa forma, a validação desta tese se apoiará na faceta descritiva.

Para a validação por meio da faceta descritiva, como foi visto anteriormente, devem ser feitas as validações: conceitual, relacionando a situação problema com o modelo conceitual; lógica, relacionando o modelo conceitual com o modelo científico; de aptidão, relacionando o modelo científico com a situação problema e de dados.

6.1 Validação conceitual

Esta validação foi realizada por meio de um questionário enviado a nove especialistas em planejamento de colheita atuando no setor. O questionário pode ser visto no Apêndice D e tem como objetivo validar as principais premissas que constituem o modelo conceitual do problema tratado. Dos nove questionários enviados, houve quatro respondidos, o que foi positivo, pois havia uma expectativa de no mínimo três respondidos por especialistas da área. Além disso, todos os entrevistados possuem experiência em planejamento em mais de uma usina, em mais de cinco anos. Os entrevistados A, B e D pertencem a departamentos de planejamento de grupos de usinas de destaque no setor. O entrevistado C possui formação acadêmica na área de planejamento e atua como consultor em mais de 50 usinas na área de planejamento e logística há cerca de 20 anos. As respostas dos questionários estão apresentadas na Tabela 49 e as respostas completas podem ser visualizadas no Apêndice E.

A primeira pergunta se refere à relevância do planejamento de colheita para o negócio de uma usina de cana de açúcar. Todos avaliaram esta atividade com a maior relevância possível. Segundo os depoimentos, esta etapa é o ponto inicial para estimar a quantidade de recursos, bem como a receita esperada da empresa agrícola. Este planejamento permite também identificar gargalos operacionais e atuar neles de maneira preventiva, bem como visualizar oportunidades de redução de custos e aumento de faturamento com base na melhoria da qualidade da matéria-prima. Todas as respostas reforçam a relevância do tema desta tese, do ponto de vista destes especialistas.

A segunda questão se refere à importância de considerar as capacidades de colheita e transporte antes de uma área ser plantada. Embora não tenha havido uma convergência como na primeira questão, os entrevistados atribuíram importância alta para esta questão também (quatro em média), o que reforça o enfoque da pesquisa desta tese na opinião desses especialistas. De acordo com as respostas obtidas, a consideração destas variáveis seria importante, entretanto, no momento do plantio deve-se levar em consideração a adequação da variedade ao ambiente de produção (entrevistados A e C). Já o entrevistado D considerou que

haveria prioridades maiores e mais básicas que viriam antes da consideração destas variáveis para que o plano de colheita tenha aderência com a realidade.

A terceira pergunta questiona como o planejamento de colheita é tratado nas usinas, de maneira mais empírica ou técnica. Conforme observado nas respostas obtidas, as ferramentas computacionais estão cada vez mais presentes nas usinas, contudo, a intervenção do corpo técnico é fundamental para tratar variáveis que as ferramentas ainda não tratam, adicionando qualidade à resposta do plano. A média foi de 3,3 que representa um misto entre empírico e técnico. A valorização do desenvolvimento de uma ferramenta baseada em aspectos técnicos reforça o desenvolvimento desta tese.

A quarta questão fala da importância de considerar outras variáveis além da distância entre a usina e o bloco de colheita. As respostas tiveram uma média de 4,5, considerando importante incorporar outras medidas além da distância para analisar o trajeto dos caminhões, o que justifica o conceito presente nesta tese. De acordo com o entrevistado D, esta medida é a mais estável e comumente utilizada para pagamento de prestadores de serviço de transporte, mas conforme mencionou o entrevistado C, o importante é o tempo de trajeto e não a distância.

A questão cinco trata da importância de se considerar a capacidade da colheita mecanizada baseada na produtividade da área, na velocidade da colhedora, no tempo de manobra da colhedora e do transbordo e no tamanho do tiro de colheita. Na média, a intensidade da importância desta questão foi de 4,5, reforçando as premissas desta tese. Estas seriam as variáveis que determinam a colheitabilidade da área, de acordo com o entrevistado C. O entrevistado D enfatiza a importância destas variáveis em usinas com poucas frentes de colheita e que pouco vem sendo utilizado na prática dos planejamentos de colheita.

A questão seis aborda o nível de dificuldade de obtenção de informações como a velocidade das vias, a produtividade da área, a velocidade da colhedora, o tempo de manobra da colhedora e do transbordo, bem como o tamanho do tiro de colheita. A média das respostas foi 2,3, ou seja, a obtenção destes dados não é difícil. A implantação nos últimos anos de ferramentas como computadores de bordo e imagens de satélite auxiliam na obtenção destes dados, de acordo com os entrevistados A e B. O entrevistado C salienta que uma equipe bem treinada é capaz de calcular os potenciais de produção dos blocos de colheita, o que vai de acordo com o que respondeu o entrevistado D. Essas respostas mostram o desenvolvimento e aplicação de abordagens de apoio à decisão para a aplicação prática.

A questão sete trata da relevância de tratar o tempo perdido das colhedoras com o deslocamento das frentes de colheita. Em média, a intensidade da importância deste

questo para os entrevistados foi alta, 4, o que também reforça o enfoque dado nesta tese. A importância está baseada na perda de produção nestes momentos, conforme salientou o entrevistado C. O entrevistado A destacou que estas perdas variam de acordo com a localização da usina. Em certas regiões do estado de São Paulo, por ser caracterizado por blocos menores do que em estados como Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, este fator é mais crítico. O entrevistado D salientou outro ponto relevante que, ao realizar uma boa condução da colheita do bloco, reservando as áreas de melhor potencial de produção do bloco para o seu término, é possível minimizar o efeito da perda de produção na mudança de área da frente.

A questão oito pergunta a respeito da adequação dos *softwares* disponíveis no mercado de planejamento de colheita, para tratar as capacidades de colheita e transporte, bem como o deslocamento das frentes. Em média, a resposta foi de satisfação com intensidade de 2,3. Conforme ressaltou o entrevistado A, a ênfase dada às ferramentas é a de maximizar toneladas de pol por hectare, por meio da idade e curva de maturação, mas atendendo também à logística por meio do raio médio. Entretanto, conforme mencionou o entrevistado C, as capacidades de transporte e colheita são tratadas separadamente das ferramentas em planilhas.

A questão nove aborda o critério que melhor representa a boa qualidade da matéria-prima no planejamento de colheita de safra, maximização do pol ou cumprimento do PUI (vide seção 2.3). Nesta questão os entrevistados apontaram que a combinação de produtividade e pol, representada pelas toneladas de pol por hectare, seria a melhor medida de qualidade. Para atingir este objetivo, o planejador utiliza a curva de maturação da variedade e respeita a idade do canavial plantado na área. É sabido que depois da safra realizada, as toneladas de pol ou ATR por hectare é um excelente indicador da qualidade da matéria-prima. Entretanto, o que é questionado neste trabalho e talvez não tenha ficado claro na questão nove é se no momento de realizar o planejamento de colheita, as curvas de maturação da variedade na usina e a estimativa de produtividade da área representariam estimadores da qualidade da matéria-prima melhores que o PUI da variedade. Este seria um interessante ponto para estudos futuros.

Dessa forma, as respostas das questões um, três e oito reforçaram a importância de tratar o planejamento de colheita de maneira mais elaborada, por ser uma atividade fundamental para a lucratividade de uma usina de cana-de-açúcar. O aprimoramento das ferramentas existentes é necessário para melhorar a aderência dos planos com a realidade das operações de colheita e transporte, diminuindo o nível de intervenção empírica da equipe técnica, muito embora esta intervenção seja necessária e agregue valor. Já as respostas às

questões dois, quatro, cinco e sete especificam que estes pontos de melhoria estariam associados com a abordagem das ferramentas existentes com relação às capacidades de colheita e transporte. No caso da colheita, o plano deve considerar os parâmetros de colheitabilidade, bem como a perda de produção devido à mudança de área, conforme é proposto neste trabalho. No caso do transporte, o plano deve abordar outras variáveis além da distância média entre o bloco e a usina, como as velocidades no trajeto, de acordo com a proposição deste trabalho. Na prática, este cálculo mais refinado de capacidade acaba sendo feito por simuladores em planilhas desvinculadas da ferramenta de planejamento. Nesta tese, propõe-se um modelo integrado. Assim, a aderência destes pontos da situação problema com o modelo conceitual proposto nesta tese pode ser considerada boa, de acordo com as respostas obtidas dos questionários. Um ponto de atenção se refere à utilização do PUI como medida de qualidade para este plano, que não conta com a opinião favorável da maioria dos especialistas entrevistados, pois indicaram a tonelada de pol por hectare como sendo a melhor medida. Como mencionado anteriormente, acredita-se que a pergunta no questionário não foi clara o suficiente para especificar que esta seria uma medida anterior à safra, e não a *posteriori*, demandando, assim, pesquisa futura para esclarecer este ponto.

Tabela 49: Apresentação da resposta dos questionários

Questões	Escala	A	B	C	D	Média	
1 - Qual a relevância do planejamento de colheita para o negócio de uma usina de cana-de-açúcar?	1- pouco relevante 5 - muito relevante	5	5	5	5	5,0	
2 - Qual a importância de considerar as capacidades de colheita e transporte antes de uma área ser plantada?	1- pouco importante 5 - muito importante	4	5	4	3	4,0	
3 - Como o planejamento de colheita é tratado em usinas de cana-de-açúcar?	1- empírico 5 - técnico	4	3	4	2	3,3	
4 - O quanto é importante considerar outras variáveis além da distância entre a usina e o bloco de colheita, como, por exemplo, a velocidade das vias?	1- pouco importante 5 - muito importante	3	5	5	5	4,5	
5 - O quanto é importante considerar a capacidade de colheita mecanizada, considerando a produtividade da área (t/ha), a velocidade da colhedora, o tempo de manobra da colhedora/transbordo e o tamanho do tiro de colheita?	1- pouco importante 5 - muito importante	5	5	5	4	4,8	
6 - Qual é o nível de dificuldade na obtenção dos dados mencionados (velocidade das vias, produtividade da área, velocidade da colhedora, tempo de manobra da colhedora/transbordo e tamanho do tiro de colheita)?	1-fácil 5-difícil	1	3	2	3	2,3	
7 - O quanto é relevante tratar o tempo perdido das colhedoras com o deslocamento das frentes de colheita?	1- pouco relevante - muito relevante	5	4	4	5	3	4,0
8 - Como os <i>softwares</i> disponíveis no mercado para planejamento de colheita tratam as capacidades de colheita e transporte, bem como o deslocamento das frentes?	1- pouco satisfatório 5 - muito satisfatório	4	1	2	2	2,3	
9 - Qual dos critérios abaixo é o melhor objetivo para a obtenção de boa qualidade da matéria-prima no planejamento de colheita de safra?	Pol, PUI ou outro	Pol	Pol	PUI	PUI		

6.2 Validação lógica

A validação lógica refere-se ao processo de modelagem do problema, que foi bastante desafiadora neste estudo. Por exemplo, o pacote GAMS permite grande facilidade ao transformar o modelo algébrico na matriz e vetores envolvidos no problema de otimização. Ele permite também criar rotinas que desviam o fluxo de execução do programa, como *loops* possibilitando a implementação das heurísticas baseadas em programação matemática, como o *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. O GAMS também permite fácil manipulação de grande quantidade de dados de entrada por meio de sua interface com o *Microsoft Excel*, bem como a exportação dos dados de saída a este tipo de planilha.

Apesar de o CPLEX possuir algoritmo bastante conhecido na literatura por sua eficiente resolução de problemas de programação inteira mista, o primeiro desafio foi o da formulação de um modelo que obtivesse boas soluções para o problema em tempos computacionais aceitáveis. O Modelo 1, seção 4.1.1.1, que representa mais fielmente o modelo conceitual, não apresentou soluções factíveis em tempos computacionais razoáveis para resolver a instância A1, da Empresa A, conforme pode ser visto na seção 5.1.3.1. Uma pequena modificação deste modelo buscando reduzir sua complexidade com base em relatos da literatura foi o Modelo 1A, seção 4.1.1.2, contudo também não apresentou soluções factíveis para a instância A1, conforme mostra a seção 5.1.3.2. O Modelo 1B, que foi uma modificação do Modelo 1 de maneira a ter soluções factíveis triviais, apresentado na seção 4.1.1.3, obteve soluções de boa qualidade para a instância A1, A4, A5, A7, A8, A9 e A11, conforme apresentado nas seções 5.1.3.3 e 5.1.5.

Os casos bem sucedidos do Modelo 1B para as referidas instâncias validam a transformação do modelo conceitual ao modelo científico. Entretanto, sua generalização deve ter certo cuidado. Primeiramente, pois, com instâncias com recursos apertados como A6 e A10, a solução não revelou resultados conclusivos. Além disso, a aplicação à instância B1 da Empresa B não trouxe bons resultados, podendo motivar pesquisa futura de investigação de métodos eficientes para a instância B1. Convém lembrar que essa instância refere-se a um problema bem maior do que o da instância A1, com muitas dezenas de milhares de variáveis inteiras e milhões de restrições.

6.3 Validação de aptidão

Este tipo de validação relaciona o quanto o modelo científico é viável para lidar com a situação problema. Primeiramente, a seção 4.1.2, que realizou experimentos com

uma instância de teste, mostrou que os três modelos propostos são coerentes e consistentes, bem como tiveram um comportamento esperado. Em especial, a seção 4.1.2.2.3 mostrou que o Modelo 1B possui grande potencial de redução de custos operacionais ao possibilitar a redução de recursos. Este benefício ficou mais evidente na seção 5.1.5.1, que mostrou a modificação das condições operacionais da safra subsequente ao seguir as sugestões de período de plantio e colheita do Modelo 1B, possibilitando reduzir uma colhedora e um caminhão, totalizando uma diminuição de custos de centenas de milhares de reais.

Em segundo lugar, a aplicabilidade do Modelo 1B no estudo de caso da Empresa A foi boa, pois gerou soluções de boa qualidade com os métodos de solução propostos (vide seção 5.1.3.3) em tempos computacionais razoáveis para o horizonte de tempo do problema abordado. A generalização para a Empresa B, entretanto, não gerou boas soluções devido ao seu contexto de maior complexidade, em termos de estrutura fundiária e mecanização (vide seção 5.2) e também do porte das instâncias envolvidas. Como mencionado anteriormente, este seria um ponto de atenção.

Finalmente, a seção 5.1.5.4 comparou a solução do Modelo 1B com uma prática usual nas usinas de setorização das frentes. Neste experimento, a capacidade de colheita não considerou a perda causada pela mudança de área, bem como considerou o potencial de colheita médio igual para todas as áreas. Neste cenário, a moagem mínima foi comprometida, incorrendo em custos de perda de moagem da ordem de centenas de milhares de reais.

6.4 Validação de dados

A validação de dados exerce um papel central para todas as facetas do tetraedro. Dados como as metas de moagem, o tempo de efetivo de safra por macroperíodo, a estimativa de produção da área de colheita, a distância entre a usina e o bloco de colheita, as áreas que devem ser colhidas manual e mecanicamente, as áreas de aplicação de vinhaça e a quantidade de colhedoras nas frentes de colheita, são necessários para o modelo. Entretanto, essas são as mesmas informações necessárias para alimentar as ferramentas existentes no mercado. Estes dados são básicos para o orçamento das usinas e são obtidos sem grandes dificuldades. Especial atenção deve ser dada à estimativa de produção da área, pois incertezas podem acontecer entre o momento do levantamento e a colheita por ser dependente de fatores climáticos.

A definição das janelas de tempo de cada área de colheita é uma informação fundamental para o modelo, bem como para o manejo varietal da usina, e devem ser avaliadas

individualmente pelo especialista de planejamento em conjunto com a equipe técnica, levando em conta a idade do canavial, características da área como as abordadas nas seções 2.5.4, 2.5.5, 2.5.6 e 2.5.7, bem como o PUI da variedade a ser plantada na área.

As horas trabalhadas de caminhões e colhedoras também são metas básicas para a área de manutenção automotiva, obtidas sem muita dificuldade. Entretanto, cabe lembrar que há incertezas relacionadas à destreza de operadores, mecânicos e ao maquinário propriamente dito, que podem causar desvios da meta no decorrer da safra. Dados como as velocidades dos veículos, tempos de permanência no campo e na usina, bem como densidade de carga dos veículos, também são informações necessárias para o cálculo do potencial de transporte (vide seção 2.2.4.3), obtidas comumente em ferramentas de logística que atuam no controle de tráfego, por meio de simples apontamentos. A coleta destes dados vem sendo aprimorada por meio de dispositivos eletrônicos embarcados, como computadores de bordo e rastreadores conectados ao banco de dados da usina, e estão sendo cada vez mais utilizados.

O tamanho do tiro de colheita é uma informação importante para a composição do potencial de produção da frente (vide seção 2.2.3.1) e pode ser estimada de várias maneiras. Baseada na análise do mapa de cada fazenda pela equipe de campo, como foi estimada para a Empresa A, ou utilizando-se SIG (Sistema de Informações Georreferenciadas), conforme foi realizado na Empresa B. Muitas usinas realizam este cálculo no momento de projetar um novo talhão ou sua reforma, que seria um procedimento mais consistente. Os tempos de manobra e a velocidade da colhedora também são parâmetros importantes para a composição do potencial de produção da frente (vide seção 2.2.3.1), podem ser obtidos pela análise da equipe técnica ou por dados provenientes de computadores de bordo nas colhedoras. Cabe ressaltar que o tiro de colheita também pode ser estimado por dispositivos eletrônicos embarcados na colhedora.

Um dado de obtenção não trivial é a distância entre os blocos de colheita, pois para o caso de 100 blocos, demandaria 10.000 medições, o que seria inviável na prática. Entretanto, pode-se estimá-lo, como foi feito neste trabalho, por meio da distância geométrica corrigida entre cada bloco, calculada a partir das coordenadas geográficas dos mesmos (vide seções 4.1.2.1, 5.1.2 e 5.2.2), que são informações bastante triviais para as usinas.

Assim, apesar de haver certo nível de incerteza inerente a um setor agroindustrial na obtenção dos dados, há viabilidade em sua coleta, sendo muitas delas úteis para outras atividades da usina como o orçamento, o dimensionamento de recursos e o manejo varietal.

6.5 Considerações sobre o processo de validação

Com a ênfase na faceta descritiva do tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993), vide Figura 23, foram realizadas as validações conceitual, lógica, de aptidão e de dados. Para a validação conceitual foi aplicado um questionário a especialistas em planejamento do setor, cujas respostas validaram as principais premissas assumidas no modelo e nesta tese. Para a validação lógica foram feitos experimentos computacionais com três modelos propostos e métodos de solução para eles, resultando no Modelo 1B como o mais bem sucedido para representar o modelo conceitual, capaz de obter soluções factíveis de boa qualidade. Para a validação de aptidão, foram feitos vários experimentos computacionais para analisar o comportamento do Modelo 1B com uma instância de teste e uma instância baseada no estudo de caso da Empresa A. Destes experimentos foram identificadas oportunidades de ganho da ordem de centenas de milhares de reais na safra subsequente, ao cumprir com as determinações do plano de colheita. Além disso, se comparado ao método tipicamente empregado no setor de utilização de capacidades de colheita médias para todas as áreas, desconsiderar a perda de capacidade devido à mudança de área e utilizar a setorização, verificou-se ganhos da ordem de centenas de milhares de reais. Quanto à validação de dados, embora haja incertezas inerentes ao setor, os dados necessários para a execução do modelo são viáveis de serem coletados e muitos deles já são utilizados em outras atividades da usina, como o orçamento, dimensionamento de recursos e manejo varietal.

7 Conclusões e propostas de extensão da pesquisa

7.1 Conclusões

Nesta tese foram estudadas, desenvolvidas, testadas, aplicadas a duas usinas e analisadas abordagens de otimização para a programação de frentes de colheita de cana-de-açúcar, visando apoiar as decisões de colheita, plantio e reforma dos blocos de colheita. Primeiramente, formulou-se o modelo conceitual (seção 2.7) que está relacionado a decisões anteriores ao plantio, quando há maior grau de liberdade para a escolha da data de colheita (seção 2.6). O plano deve identificar o melhor momento para colher a área a ser plantada e, a partir daí, escolher a variedade a ser plantada, levando em conta características da área como risco de incêndio (seção 2.5.4), de inundação (seção 2.5.5), solos com baixa retenção de água (seção 2.5.6) e condição de trafegabilidade das estradas (seção 2.5.7). Este modelo trata as áreas já plantadas por meio de janelas de tempo (seção 2.3) e considera capacidades de transporte (seção 2.2.4.3) e colheita (seção 2.2.3.1). Quando é relevante para o transporte de pessoas para as frentes de colheita, técnicas de setorização devem ser empregadas (seção 2.4). Na colheita são considerados os tempos perdidos com a mudança de área da frente, que seriam equivalentes ao tempo de *setup*.

Na seção 3.1 foi realizada uma ampla revisão da literatura referente a modelos de planejamento da produção em usinas de cana-de-açúcar em que os trabalhos foram classificados (vide seção 2.6) de acordo com o tipo de tomada de decisão proporcionada na cadeia sucroenergética. Após esta revisão, verificou-se na seção 3.1.11 que embora houvessem vários trabalhos próximos na literatura, como Grunow *et al.* (2007) e Jena e Poggi (2013), não há estudos que resolvam o problema conceitual da mesma maneira como definido nesta tese.

Além da literatura internacional, quando comparado aos pacotes computacionais de planejamento de colheita presentes em usinas de cana-de-açúcar, o modelo conceitual proposto também representa melhor o fenômeno estudado. Primeiramente, ele inclui na solução a indicação da melhor frente para colher uma área ao invés de presumir sua determinação prévia por um especialista, cuja capacidade de analisar as variáveis envolvidas simultaneamente é menor que a de um modelo de otimização. Em segundo lugar, o modelo proposto considera o potencial de colheita de cada área, que se trata de uma variável cada vez mais significativa para reproduzir o fenômeno em um contexto de colheita mecanizada, e estima a perda de tempo com mudanças de área, que não são tratados por estes pacotes. Além

disso, trata o potencial de transporte com maior precisão incluindo a influência das velocidades das vias e quantidade de carga transportada, ao invés de utilizar simplesmente a distância média entre a usina e o bloco de colheita. Finalmente, ele trata janelas de tempo (vide seção 2.3) para caracterizar os períodos em que cada bloco pode ser colhido, conceito mais abrangente que o tempo entre colheitas (idade), usualmente utilizada nos pacotes de mercado.

O primeiro esforço de modelagem foi aqui realizado utilizando uma analogia da programação das frentes com o problema de roteamento de veículos (VRP), brevemente revisado na seção 3.2 e Apêndice A. Este esforço foi compilado no Apêndice B e acredita-se que seja promissor investigar melhor este tipo de analogia em pesquisa futura, embora não tenha obtido bons resultados nesta pesquisa.

Na seção 4.1 foram propostos modelos matemáticos (Modelos 1, 1A e 1B) baseados no problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com *setup* dependente da sequência e máquinas paralelas, inspirados em uma cuidadosa revisão da literatura na seção 3.3.1. Experimentos computacionais foram realizados com problemas pequenos na seção 4.1.2, para comparar os três modelos e verificar se o comportamento deles representa adequadamente o modelo conceitual. Os experimentos mostraram que as diferenças dos Modelos 1A e 1B em relação ao Modelo 1 não são significativas. Embora este último seja o que melhor adere ao modelo conceitual, seguido pelo Modelo 1B, o comportamento dos três é representativo do fenômeno. Nessas soluções experimentais com problemas pequenos foi observada a relevância do custo da perda de moagem frente ao custo de superdimensionamento de recursos de colheita e transporte, todavia se o suprimento estiver garantido, a redução da ociosidade implicará em diminuição representativa nos custos. Além disso, foram observadas também oportunidades de se reduzir custos operacionais, ao se relaxar restrições de janela de tempo na modelagem (seção 4.1.2.2.3).

Como o modelo proposto é de grande porte nos casos reais das usinas, métodos de resolução utilizando-se heurísticas baseadas em programação matemática do tipo *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, foram estudados como opções de resolver o problema em tempos computacionais aceitáveis e com soluções de qualidade. O modelo matemático e vários métodos de resolução foram aplicados, nas seções 5.1.3 (Empresa A) e 5.2.3 (Empresa B), a duas empresas de porte médio do setor, mas com características distintas de idade de fundação, estrutura fundiária e nível de mecanização.

Para o caso da Empresa A, o Modelo 1 em uma instância desconsiderando as janelas de tempo obteve uma solução factível, que pode ser considerado um bom resultado

por se tratar de um modelo bastante restrito. Já o Modelo 1A obteve uma solução factível para uma instância com janelas de tempo, mas considerando um período mais curto de safra (quatro meses). Já com o Modelo 1B, que permite soluções factíveis triviais, alguns dos métodos propostos obtiveram soluções de qualidade, mostrando o potencial das abordagens propostas para tratar situações reais. No entanto, o mesmo não aconteceu para a Empresa B, que possui maior porte e complexidade em suas variáveis, mostrando limitações das abordagens propostas. Assim, embora o Modelo 1B tenha tido resultados promissores para a Empresa A, deve-se ter cuidado com sua generalização, por não ter encontrado uma solução de qualidade para a Empresa B. Além disso, as heurísticas envolvendo uma fase construtiva com o *relax-and-fix* e outra de melhoria com o *fix-and-optimize* são tão competitivas como o CPLEX limitado para um tempo de execução máximo de 180.000 segundos. Estas duas estratégias obtiveram tempos computacionais e qualidade da solução similares para a Empresa A. Outra estratégia promissora adotada foi utilizar a solução do Modelo 1B como solução inicial do Modelo 1, que se adere melhor ao modelo conceitual da pesquisa.

A partir de uma das soluções de qualidade obtida com o Modelo 1B para a Empresa A na seção 5.1.3.3, simulou-se na seção 5.1.5.1 vários cenários. O primeiro cenário resolve o problema para uma safra subsequente em que o plano gerado tenha sido completamente cumprido. Neste sentido, verificou-se redução de complexidade na segunda safra e a possibilidade de diminuição de recursos de colheita e transporte, gerando uma redução de custos operacionais da ordem de centenas de milhares de reais. Este comportamento não só era esperado como um dos maiores benefícios vislumbrados por esta abordagem, pois a área de plantio, que possui maior grau de liberdade em termos de época de colheita, foi inserida no plano de maneira a favorecer a logística de colheita e transporte. Além disso, com uma complexidade menor, foi possível resolver este problema com um tempo computacional de cerca de meia hora, que pode ser considerado baixo devido ao porte do problema.

Outras simulações foram feitas verificando o efeito de aumentar e diminuir uma frente na seção 5.1.5.2. Desta análise verificou-se que esta alteração não era significativa para o caso da Empresa A e outros fatores deveriam ser analisados, como a diluição dos custos fixos e a capacidade da estrutura da frente, composta pelo líder da frente, auxiliares no malhador, mecânicos e brigada de incêndio. Dessa forma, é possível pensar em investigações futuras para analisar as variáveis determinantes do tamanho de uma frente de colheita.

Também foi analisada a exclusão das limitações das janelas de tempo para a colheita dos blocos na seção 5.1.5.3. Entretanto, para o caso estudado, não se constatou

melhorias importantes, muito embora, para outras instâncias de dados, possíveis melhorias possam existir. Em pesquisas futuras seria interessante verificar se outras instâncias não apresentam comportamentos diferentes.

A seção 5.1.5.3 compara uma boa solução obtida pelo Modelo 1B proposto com a prática típica do setor de setorização. Embora a solução obtida por meio da setorização seja boa, ela foi pior do que a obtida pelo Modelo 1B proposto, o que evidencia o potencial de aplicação deste modelo em situações reais. Além disso, foi realizado outro experimento nesta seção, considerando os potenciais de capacidade de colheita uniforme e desconsiderando as perdas de tempo com a colheita. A solução obtida neste experimento foi inserida no contexto real com potenciais de capacidades de colheita variáveis, e foi possível verificar que a solução não atende às restrições de moagem. O custo gerado por falha no suprimento de matéria-prima nesta solução é da ordem de centenas de milhares de reais.

Este estudo, entretanto, não foi capaz de implementar este modelo no cotidiano de uma usina e medir seus resultados, assim como avaliar suas vantagens e desvantagens, devido ao limitado tempo para o desenvolvimento e conclusão da tese. Entretanto, foi possível realizar uma validação enfatizando a faceta descritiva de uma metodologia de validação proposta na literatura, como mostra o capítulo 6. Quatro etapas de validação foram realizadas para contemplar a análise desta faceta: conceitual, lógica, de aptidão e de dados. Todas as etapas de validação foram bem sucedidas, conforme pode ser visto na seção 6.5.

7.2 Propostas de extensão da pesquisa

Os resultados obtidos nesta tese são promissores e encorajam o desenvolvimento de pesquisas futuras para aprimorar a modelagem e os métodos de solução. Sugere-se também pesquisas para aumentar a adequação dos modelos com a realidade das usinas de cana-de-açúcar, bem como ampliar o escopo de utilização dos modelos para outros elos da cadeia e outras agroindústrias. A realização de procedimentos de desagregação para a programação de safra alimentar o plano operacional também é interessante ser pesquisada, bem como a expansão do modelo para um contexto de multi-unidades.

Quanto às modificações na formulação dos modelos, a analogia com o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo, frota heterogênea e entrega fracionada poderia ser revisitada buscando formas alternativas para tratar as restrições de capacidade de colheita e transporte. Com este tipo de formulação, há uma vasta literatura de métodos de solução utilizando heurísticas e meta-heurísticas que poderiam resolvê-lo. Para o Modelo GLSPPL, outros métodos de solução poderiam ser abordados, como de

decomposição e meta-heurísticas, além de uma heurística combinando o Modelo 1B com o Modelo 1. Espera-se com estas pesquisas obter soluções factíveis para o Modelo 1 com as instâncias utilizadas no estudo da Empresa A, bem como soluções de melhor qualidade para o Modelo 1B no estudo da Empresa B. Além disso, espera-se a obtenção de soluções de qualidade em tempos computacionais menores, bem como de problemas com porte maior que os apresentados nesta tese.

Outra vertente para pesquisas futuras com os modelos desenvolvidos nesta tese é o teste e o uso cotidiano destes modelos nas usinas de cana-de-açúcar. Neste tipo de pesquisa, o planejador da usina juntamente com pesquisador estariam periodicamente aplicando o modelo para orientar o plantio e a colheita das áreas de cana-de-açúcar. Em conjunto com a equipe agrícola estariam detectando desvios e reavaliando premissas. Com esta dinâmica acontecendo, é possível comparar os custos operacionais com os obtidos pelo método anterior da usina, e avaliar ganhos reais com a abordagem sugerida. Espera-se com este tipo de pesquisa aplicar a faceta pragmática do método de validação utilizado neste estudo, pois esta faceta analisa com maior profundidade a adequação entre a solução obtida e a situação problema identificada. Dentro desta perspectiva, pode-se pensar também no desenvolvimento de um *software* de apoio à tomada de decisão utilizando os modelos sugeridos e com interface amigável o suficiente para ser utilizado diretamente pelo planejador.

Outra pesquisa envolvendo modificações nos modelos para torná-los mais adequados à realidade das usinas seria o tratamento de incertezas em parâmetros importantes na alimentação dos modelos como a moagem da indústria, a produtividade das áreas, os potenciais de capacidade de transporte e colheita. Além disso, ainda se tratando de parâmetros do modelo, sugere-se pesquisas envolvendo a proposição de estimadores da qualidade da cana-de-açúcar mais adequados para um horizonte de tempo da safra.

Em termos de aumento de escopo na aplicação dos modelos propostos, pesquisas futuras poderiam investigar aplicações em outras usinas de cana-de-açúcar de outros estados produtores como Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e Alagoas; além de usinas com sistemas produtivos diferentes dos típicos como o cultivo orgânico de cana-de-açúcar e o manejo de áreas irrigadas. Além disso, os modelos propostos podem ser aplicados em outras agroindústrias, especialmente em sistemas produtivos que possuem longos períodos de safra, frentes de colheita dispersas e processamento centralizado, como no caso do corte de madeira para a indústria de papel e celulose, ou da colheita de grandes fazendas de café.

Sugere-se também pesquisas relacionadas à integração dos modelos propostos com outros modelos de apoio à tomada de decisão que atuam em outros contextos no sistema agroindustrial da cana-de-açúcar. Uma primeira integração a ser investigada seria com a tomada de decisão no plantio considerando os blocos em que há muda disponível, envolvendo as capacidades de colheita de muda, transporte e plantio. Os modelos propostos se tornariam mais restritivos, todavia aumentaria a aderência deles à realidade, pois a solução traria períodos de plantio em que haja mudas disponíveis do tipo de variedade desejado a uma distância do bloco a ser plantado que não comprometa a capacidade de transporte da muda. Um segundo tipo de integração seria em relação à tomada de decisão nos elos industriais e de distribuição física. Com este tipo de integração, períodos com limitações na capacidade de processamento industrial poderiam ser relacionados a períodos com menores capacidades de colheita e transporte, proporcionando redução de recursos. Outro tipo de integração que pode gerar interessantes pesquisas futuras está relacionado ao transporte de funcionários às frentes de colheita, que deve minimizar o deslocamento dos ônibus e geração de horas extras de trabalho.

Pesquisas envolvendo métodos de desagregação também são sugeridas para que a solução obtida alimente os planos operacionais de colheita e, conseqüentemente, o controle de tráfego. Espera-se com este tipo de pesquisa obter ferramentas para evitar desvios entre planejamento e operação.

Por fim, com a formação de grandes *clusters* de usinas com distâncias relativamente pequenas entre si, é possível pensar em frentes de colheita que atendam a mais de uma unidade em uma mesma safra. Assim, outra pesquisa sugerida é o desdobramento dos modelos propostos em problemas multi-unidades, em que as frentes de colheita se deslocam o mínimo possível e mantêm um posicionamento que não comprometa o transporte de funcionários. O ajuste de suprimento de matéria-prima das frentes de colheita às unidades fabris deve estar adequado às flutuações de capacidade esperadas do processo industrial.

Referências Bibliográficas

- AHUMADA, O.; VILLALOBOS, J. R. Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 1, p. 1-20, July, 2009.
- ALLAHVERDI, A.; NG, C. T.; CHENG, T. C. E.; KOVALYOV, M. Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 985–1032, June, 2008.
- ARANHA, C.; YAHN, C. A. Botânica da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. **Cana-de-açúcar: Cultivo e Utilização**, Campinas: Fundação Cargil, 1987.
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M.; CLARK, A. R. Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. **Journal of Heuristics**, v. 13, n. 4, p. 337–358, Aug. 2007.
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. **Computers & Operations Research**, v. 35, n.3, p. 916–932, Mar. 2008.
- ARCHETTI, C.; FEILLET, D. ; GENDREAU, M.; SPERANZA, M. G. Complexity of the VRP and SDVRP. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 5, p. 741-750, Aug. 2011.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ARJONA, E.; BUENO, G.; SALAZAR, L. An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 32, n. 3, p. 247-264, Oct. 2001.
- ATAMTÜRK, A.; SAVELSBERGH, M. W. Integer-Programming Software Systems. **Annals of Operations Research**, v. 140, n. 1, p. 67–124, Nov. 2005.
- BALDO, T. A.; SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B.; MORABITO, R. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. **Computers & Industrial Engineering**, v. 72, p. 58–71, June, 2014.
- BALL, M; MAGAZINE, M. The design and analysis of heuristics. **NETWORKS**, v. 11, n. 2, p. 215-219, Summer, 1981.
- BALLOU, R. B. **Business Logistics / Supply Chain Management**. Prentice-Hall, 2004.
- BARATA, M. Q. F. **Otimização econômica do corte e reforma de canaviais**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- BASTOS, K. Z. **Modelos de simulação para análise e apoio à decisão nos processos de corte mecanizado, carregamento e transporte no agronegócio da cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BELFIORE, P.; YOSHIKAZI, H. T. Y. Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 750-758, Dec. 2009.

BERALDI, P.; GHIANI, G. ; GRIECO, A.; GUERRIERO, E. Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 11, p. 3644-3656, Nov. 2008.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BEZUIDENHOUT, C. N.; BAIER, T. J. A. A global review and synthesis of literature pertaining to integrated sugarcane production systems. **Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists Association**, n. 82, p. 93-101, 2009.

BITRAN, G. R.; YANASSE, H. H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. **Management Science**, v. 28, n. 10, p. 1174-1186, 1982.

BLAZEVICZ, J.; DROR, M. ; WEGLARZ, J. Mathematical programming formulations for machine scheduling: A survey. **European Journal of Operational Research**, v. 51, n. 3, p. 283-300, Apr. 1991.

BODIN, L.; GOLDEN, B. ; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. **Computers and Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 63-67, 69-115, 117-147, 149-193, 195-211, 1983.

BORENSTEIN, D. Towards a practical method to validate decision support systems. **Decision Support Systems**, v. 23, n. 3, p. 227-239, July, 1998.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process**. Primeira edição. McGraw-Hill, 1996.

BRÄYSY, O.; GENDREAU, M. Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. **Transportation Science**, v. 39, n. 1, p. 104-118, Feb. 2005.

BRÄYSY, O.; GENDREAU, M. Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics. **Transportation Science**, v. 39, n. 1, p. 119-139, Feb. 2005.

BRÜGGEMANN, W.; JAHNKE, H. The discrete lot-sizing and scheduling problem: Complexity and modification for batch availability. **European Journal of Operational Research**, v. 124, n. 3, p. 511-528, Aug. 2000.

CAIXETA-FILHO, J. V. Orange harvesting scheduling management: a case study. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 6, p. 637-642, June, 2006.

CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S.; SERRA, G. E. Programação matemática aplicada à colheita de cana-de-açúcar com ênfase na recuperação máxima de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 1, p. 1-8, jan/abr, 2004.

CARVALHO, M. D. **Proposta de um modelo de planejamento agregado da produção numa usina de açúcar e álcool vinculado à flutuação de preços em mercados à vista e no futuro.** Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CATTRYSSE, D.; MAES, J.; WASSENHOVE, L. N. V. Set partitioning and column generation heuristics for capacitated dynamic lotsizing. **European Journal of Operational Research**, v. 46, n. 1, p. 38-47, May, 1990.

CATTRYSSE, D.; WASSENHOVE, L. N. V. A survey of algorithms for the generalized assignment problem. **European Journal of Operational Research**, v. 60, n. 3, Aug. 1992.

CEPEA. **Série de preços do açúcar.** 2011. Disponível em <http://cepea.esalq.usp.br/indicador/> Acesso em 21 de abril de 2011.

CEPEA/ESALQ. **Análise conjuntural do açúcar.** 2011. Disponível em http://www.cepea.esalq.usp.br/agromensal/2010/12_dezembro/AcucarAlcool.htm#_II_-_Séries_1 Acesso em 21 de abril de 2011.

CHEN, W. H.; THIZY, J. M. Analysis of relaxations for the multi-item capacitated lot-sizing problem. **Annals of Operations Research**, v. 26, n. 1, p. 29-72, 1990.

CLARK, A. R. Optimization approximations for capacity constrained material requirements planning. **International Journal of Production Economics**, v. 84, n. 2, p. 115–131, May, 2003.

CLARK, A. R.; MORABITO, R.; TOSO, E. A. V. Production setup-sequencing and lot-sizing at an animal nutrition plant through ATSP subtour elimination and patching. **Journal of Scheduling**, v. 13, n. 2, p. 111–121, 2010.

COLIN, E. C. Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 1, p. 232-235, Nov. 2009.

COLIN, E. C., F. A. M. CIPPARRONE, e T. SHIMIZU. Otimização do custo de transporte na distribuição-armazenagem de açúcar. **Produção**, v. 9, n. 1, p. 23-30, 1999.

CORDEAU, J. F.; GENDREAU, M.; HERTZ, A.; LAPORTE, G.; SORMANY, J. S. **New heuristics for the vehicle routing problem.** Technical Report G-2004-33, Montreal: GERAD, 2004.

CORDONE, R.; CALVO, R. A heuristic for the vehicle routing problem with time windows. **Journal of Heuristics**, v. 7, n. 2, p. 107–129, Mar. 2001.

CSCMP. **Supply Chain Management: Terms and Glossary.** COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. 2011. Disponível em <http://www.cscmp.com/>. Acesso em 26 de junho de 2011.

CYNAMON, J. J. The basics. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ...** Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY, 1992. p. II-1 a II-16.

DANNA, E.; ROTHBERG, E.; PAPE, C. L. Exploring relaxation induced neighborhoods to improve MIP solutions. **Mathematical Programming**, v. 102, n. 1, p. 71–90, Jan. 2005.

DAVIS, P. K. A framework for verification, validation and accreditation. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ...** Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY, 1992. p. VI-1 a VI-24.

DE VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; DA SILVA, A. J. N.; DE OLIVIERA, V. S.; DA SILVA, Y. J. A. B. Limits of consistency chemical properties of a dystrophic cohesive yellow latosol under different sugarcane residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 639-648, Maio, 2010.

DÉRY, R.; LANDRY, M.; BANVILLE, C. Revisiting the issue of model validation in OR: An epistemological view. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p. 168-183, Apr. 1993.

DESROCHERS, M.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. **Operations Research**, v. 40, n. 2, p. 342-354, Mar.-Apr., 1992.

DIABY, M.; BAHL, H. C.; KARWAN, M. H.; ZIONTS, S. Capacitated lot-sizing and scheduling by Lagrangean relaxation. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 3, p. 444-458, June, 1992.

DREXL, A.; HAASE, K. Proportional lotsizing and scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 40, n. 1, p. 73-87, June, 1995.

DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, n. 2, p. 221-235, June, 1997.

DROR, M.; TRUDEAU, P. Savings by split delivery routing. **Transportation Science**, v. 23, n. 2, p. 141-145, May, 1989.

DROR, M.; LAPORTE, G. ; TRUDEAU, P. Vehicle routing with split deliveries. **Discrete Applied Mathematics**, v. 50, n. 3, p. 239-254, May, 1994.

ESCUADERO, L F; SALMERON, J. On a fix-and-relax framework for a class of project scheduling problems. **Annals of Operations Research**, v. 140, n. 1, p. 163–188, Nov. 2005.

ESTADO DE SÃO PAULO. **Diminuição Queimadas – Protocolo Agroambiental**. 10 de março de 2008. Disponível em :<http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/lenoticia.php?id=93169&c=201>. Acesso em 03 de 07 de 2011.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2003.

FERREIRA, D. **Abordagens para o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de bebidas**. Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 697–706, July, 2009.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot sizing models for small-scale soft drink plants. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 4, p. 684-691, Apr. 2010.
- FERREIRA, D.; CLARK, A. R.; ALMADA-LOBO, B.; MORABITO, R. Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. **International Journal of Production Economics**, v. 136, n. 2, p. 255–265, Apr. 2012.
- FINLAY, P. N.; WILSON, J. M. Validation for Decision Support Systems: Recent Developments and Findings. **Systems Practice**, v.4, n.6,p.599-610, May, 1991.
- FISCHETTI, M.; GLOVER, F.; LODI, A. The feasibility pump. **Mathematical Programming**, v. 104, n. 1, p. 1-17, Sep. 2005.
- FISHETTI, M.; LODI, A. SALVAGNIN, D. Chapter 2: Just MIP it! In: MANIEZZO, V. **Matheuristics, Annals of Information Systems**. Springer Science+Business Media, 2009.
- FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 44, n. 3, p. 337-348, Feb. 1990.
- FLEISHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 2, p. 395-404, June, 1994.
- FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. The general lotsizing and scheduling problem. **Operations Research Spectrum**, v. 19, n. 1, p. 11-21, 1997.
- GASS, S. I. Managing the modeling process: A personal reflection. **European Journal of Operational Research**, v. 31, n. 1, p.1-8, July, 1987.
- GASS, S. I. Model accreditation: A rationale and process for determining a numerical rating. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p.250-258, Apr. 1993.
- GAUCHER, S.; LE GAL, P. Y.; SOLER, G. Modelling supply chain management in the sugar industry. **Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists Association**, v. 77, p. 542-554, 2003.
- GAVER, D. P. Face validation and face validity. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ... Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY**, 1992. p. IV-21 a IV-22.
- GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; MUSARAGANYI, C.; TAILLARD, E. A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 26, n. 12, p. 1153-1173, Oct. 1999.
- GIADROSICH, D. Validating models and simulations. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ...**

Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY, 1992. p. IV-1 a IV-16.

GILBERT, R. A.; SHINE, J. M. ; MILLER, J. D.; RICE, R. W.; ODERO, D. C. Maturity curves and harvest schedule: recomendations for CP sugarcane varieties. **SSAGR221**, p. 1-6, Nov. 2012.

GOLDEN, B.; ASSAD, A. ; LEVY, L.; GHEYSENS, F. The fleet size and mix vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 11, n. 1, p. 49-66, 1984.

GRUNOW, M.; GÜNTHER, H. O.; WESTINNER, R. Supply optimization for the production of raw sugar. **International Journal of Production Economics**, v. 110, n. 1-2, p. 224-239, Oct. 2007.

GUAN, S.; NAKAMURA, M. ; SHIKANAI, T. ; OKAZAKI, T. Resource assignment and scheduling based on a two-phase metaheuristic for cropping system. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 66, n. 2, p. 181-190, May, 2009.

GUILLEMAN, E.; LE GAL, P. Y.; MEYER, E.; SCHMIDT, E. Assessingthe potentialfor improving mill area profitability by modifying cane supply and harvest scheduling: A South African study. **Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists Association**, v. 77, p. 566-579, 2003.

GUISE, J. W. B.; RYLAND, G. J. Production scheduling and allocation: a normative decision model for sugar milling. **Australian Journal of Agricultural Economics**, v. 13, n. 1, p. 8-24, 1969.

HAASE, K.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities. **International Journal of Production Economics**, v. 66, n. 2, p. 159-169, June, 2000.

HAHN, M. H.; RIBEIRO, R. V. Heuristic guided simulator for the operational planning of the transport of sugar cane. **Journal of the Operational Reserach Society**, v. 50, n. 5, p. 451-459, 1999.

HARRIS, F. W. How many parts to make at once. **The Magazine of Management**, v. 10, n. 2, p. 135-136, 152, Feb. 1913.

HAX, A.; CANDEA, D. **Production and Inventory Management**. N J: Prentice-Hall, 1984.

HELBER, S.; SAHLING, F. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem. **International Journal of Production Economics**, v. 123, n. 2, p. 247-256, Feb. 2010.

HIGGINS, A. Optimizing cane supply decisions within a sugar mill region. **Journal of Scheduling**, v. 2, n. 5, p. 329-344, Sep.-Oct. 1999.

HIGGINS, A. Australian sugar mills optimize harvester rosters to improve production. **Interfaces**, v. 32, n. 3, p. 15-25, May, 2002.

HIGGINS, A. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. **European Journal of Operational Research**, v. 170, n. 3, p. 987-1000, May, 2006.

HIGGINS, A.; DAVIES, I. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 47, n. 2, p. 85-102, May, 2005.

HIGGINS, A.; LAREDO, L. A. Improving harvesting and transport planning within a sugar value chain. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, p. 367-376, Apr. 2006.

HIGGINS, A.; MUCHOW, R. Assessing the potential benefits of alternative cane supply arrangements in the Australian sugar industry. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 2, p. 623-638, 2003.

HIGGINS, A.; POSTMA, S. Australian sugar mills optimise siding rosters to increase profitability. **Annals of Operations Research**, v. 128, n. 1-4, p. 235-249, Apr. 2004.

HIGGINS, A.; ANTONY, G.; SANDELL, G.; DAVIES, I.; PRESTWIDGE, D.; ANDREW, B. A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems**, v. 82, n. 2, p. 99-115, Nov. 2004.

HIGGINS, A.; HAYNES, M.; MUCHOW, R.; PRESTWIDGE, D. Developing and implementing optimised sugarcane harvest schedules through participatory research. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 55, n. 3, p. 297-306, Mar. 2004.

HIGGINS, A.; THORBURN, P.; ARCHER, A.; JAKKU, E. Opportunities for value chain research in sugar industries. **Agricultural Systems**, v. 94, n. 3, p. 611-621, June, 2007.

HIGGINS, A.; MUCHOW, R.; RUDD, A.; FORD, A. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**, v. 57, n. 2, p. 153-162, May, 1998.

HOESEL, S.; KOLEN, A. A linear description of the discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 2, p. 342-353, 1994.

IANONI, A. P. **Análise do sistema logístico de descarga de cana-de-açúcar: um estudo de caso em uma grande usina na região de Ribeirão Preto**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

IANONI, A. P.; MORABITO, R. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 42, n. 3, p. 191-210, 2006.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 3, p. 1855-1875, Mar. 2007.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 6, p. 1619-1643, 2008.

JENA, S. D. **A mixed integer programming approach for sugar cane cultivation and harvest planning**. Dissertação de mestrado apresentada à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

JENA, S. D.; POGGI, M. Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. **European Journal of Operational Research**, v. 230, n. 2, p. 374–384, Oct. 2013.

JIAO, Z.; HIGGINS, A. J.; PRESTWIDGE, D. B. An integrated statistical and optimisation approach to increasing sugar production within a mill region. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 48, n. 2, p. 170-181, Aug. 2005.

JOHNSON, L.; MONTGOMERY, D. **Operations Research in Production, Planning Scheduling and Inventory Control**. N Y: John Wiley & Sons, 1974.

JÓZEFOWSKA, J.; ZIMNIAK, A. Optimization tool for short-term production planning and scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 112, n. 1, p. 109–120, Mar. 2008.

KALLEHAUGE, B.; LARSEN, J.; MADSEN, O. B. G.; SOLOMON, M. M. Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: DESAULNIERS, G.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. M. **Column Generation**, p. 67-98. 2005.

KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, v. 31, n. 5, p. 365-378, Oct. 2003.

KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIKAWA, H. Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry: a case study. **International Transactions in Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 425-439, Sep. 2006.

KHOUIJA, M. The single-period (news-vendor) problem: literature review and suggestions for future research. **Omega**, v. 27, n. 5, p. 537-553, Oct. 1999.

KIRKA, Ö.; KÖKTEN, M. A new heuristic approach for the multi-item dynamic lot sizing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 2, p. 332-341, June, 1994.

KUIK, R.; SALOMON, M.; WASSENHOVE, L. Batching decisions: structure and models. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 2, p. 243-263, June, 1994.

KULLAPAPRUK, P.; PATHUMNAKUL, S. ; SETTHANAN, K. Application of crop growth simulation and mathematical modeling to supply chain management in the Thaisugar industry. **Agricultural Systems**, v. 102, n. 1-3, p. 58-66, Oct. 2009.

LABYS, W. C. Evaluation of models. **Energy**, v.15, n.3-4, p.155-162, 1990.

LANDRY, M.; ORAL, M. In search of a valid view of model validation for operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p. 161-167, Apr. 1993.

LANDRY, M.; MALOUIN, J.-L.; ORAL, M. Model validation in operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 14, n. 3, p.207-220, Nov. 1983.

- LANG, J. C.; SHEN, Z. J. M. Fix-and-optimize heuristics for capacitated lot-sizing with sequence-dependent setups and substitutions. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 595–605, Nov. 2011.
- LAPORTE, G. The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 3, p. 345-358, June, 1992.
- LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operations Research**, v. 7, n. 4-5, p. 285-300, Sep. 2000.
- LARSON, R. C.; ODONI, A. R. **Urban operations research**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.
- LE GAL, P. Y.; LE MASSON, J.; BEZUIDENHOUT, C. N.; LAGRANGE, L. F.; LYNE, P. W. Y. Impact of harvest mechanization on mill cane supply: a modelling approach. **Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists Association**, v. 81, p. 418-421, 2008.
- LE GAL, P. Y.; LEJARS, C.; AUZOUX, S. MAGI: A simulation tool to address cane supply chain management. **Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists Association**, v. 77, p. 555-565, 2003.
- LE GAL, P. Y.; MASSON, J. L.; BEZUIDENHOUT, C. N.; LAGRANGE, L. F. Coupled modelling of sugarcane supply planning and logistics as a management tool. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 2, p. 168-177, Oct. 2009.
- LE GAL, P. Y.; LYNE, P. W. L.; MEYER, E.; SOLER, L. G. Impact of sugarcane supply scheduling on mill sugar production: A South African case study. **Agricultural Systems**, v. 96, n. 1-3, p. 64-74, Mar. 2008.
- LEJARS, C.; LE GAL, P. Y.; AUZOUX, S. A decision support approach for cane supply management within a sugar mill area. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, n. 2, p. 239-249, Mar. 2008.
- LEJARS, C.; AUZOUX, S.; SIEGMUND, B.; LETOURMY, P. Implementing sugarcane quality-based payment systems using a decision support system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 225-233, 2010.
- LOGTRAC. **Arquivo de fotos**. 2009.
- LOGTRAC. **Treinamento de controladores de tráfego**. 2010.
- LOGTRAC. **Treinamento de líderes de frente de colheita**. 2010.
- LOGTRAC. **Treinamento de planejamento de colheita**. 2010.
- LUCHE, J. R.; MORABITO, R.; PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 26, n. 3, p. 421–443, June, 2009.

MAES, J.; MCCLAIN, J. O.; WASSENHOVE, L. N. V. Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics. **European Journal of Operational Research**, v. 53, n., p. 131-148, July, 1991.

MARKESTRAT. **Mapeamento e quantificação do setor sucroenergético**. Relatório Final apresentado à UNICA, Ribeirão Preto : Fundace, 2009.

MATEUS, G. R.; RAVETTI, M. G.; SOUZA, M. C.; VALERIANO, T. M. Capacitated lot sizing and sequence dependent setup scheduling: an iterative approach for integration. **Journal of Scheduling**, v. 13, n. 3, p. 245–259, June, 2010.

MELE, F. D.; KOSTIN, A. M.; GOSÁLBEZ, G. G.; JIMÉNEZ, L. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 9, p. 4939-4958, 2011.

METZGER, J. Verification. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ... Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY**, 1992. p. III-1 a III-12.

MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. **European Journal of Operational Research**, v. 120, n. 2, p. 311-326, Jan. 2000.

MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. **European Journal of Operational Research**, v. 139, n. 2, p. 277-292, June, 2002.

MEYR, H.; MANN, M. A decomposition approach for the general lotsizing and scheduling problem for parallel production lines. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 3, p. 718-731, 2013.

MILAN, E. L.; FERNANDEZ, S. M.; ARAGONES, L. M. P. Sugar cane transportation in Cuba, a case study. **European Journal of Operations Research**, v. 174, n. 1, p. 374-386, Oct. 2006.

MISER, H. J. A foundational concept of science appropriate for validation in operational research. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p.204-215, Apr. 1993.

MITROFF, I.; BETZ, F.; PONDY, L.; SAGASTI, F. On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 46-58, May, 1974.

MORABITO, R.; IANNONI, A. P. Logística agroindustrial. In: BATALHA, M. O. **Gestão Agroindustrial**. v. 1, 3a. ed. São Paulo - SP: Ed. Atlas, 2007.

MORABITO, R.; PUREZA, V. M. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**, cap. 8, p. 165-194. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MUCHOW, R.; HIGGINS, A.; RUDD, A.; FORD, A. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia II. Sensitivity to crop age nad crop class distribution. **Field Crops Research**, v. 57, n. 3, p. 243-251, June, 1998.

MUNDIM, J. U. C. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar.** Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NAHMIAS, S. **Production and Operations Analysis** 2nd. ed. Irvin, 1993.

NEUNGMATCHA, W.; SETHANAN, K.; GEN, M.; THREERAKULPISUT, S. Adaptive genetic algorithm for solving sugarcane loading stations with multi-facility services problem. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 98, p. 85-99, Oct. 2013.

NUNES JR, M. S. D. Variedades de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. **Cana-de-açúcar: Cultivo e Utilização.** Campinas: Fundação Cargil, 1987.

ORAL, M.; KETTANI, O. The facets of the modeling and validation process in operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p.216-234, Apr. 1993.

PAESSENS, H. The savings algorithm for the vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 34, n. 3, p. 336-344, Mar. 1988.

PAIVA, R. P. O. **Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool.** Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

PAIVA, R. P. O. **Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucro energético utilizando programação matemática e otimização robusta.** Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. An optimisation model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. **Annals of Operations Research**, v. 169, n. 1, p. 117-130, Sep. 2009.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Programação estocástica robusta aplicada ao planejamento agregado de safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético. **Gestão e Produção**, v. 18, n. 4, p. 719-738, 2011.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Otimização do planejamento hierárquico da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético. **Produção**, v. 23, n. 3, p. 449-467, 2013.

PARNAUDEAU, V.; CONDOM, N.; OLIVER, R.; CAZEVIEILLE, P.; RECOUS, S. Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1553-1562, Apr. 2008.

PECEGE. **Custos de Produção Agrícola e Industrial de Açúcar e Álcool no Brasil na Safra 2007/2008.** Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA., Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia, 2009.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Acompanhamento da safra 2010/2011 - Centro-Sul.** Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA., Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia, 2011.

PECEGE. **Custos de produção de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol no Brasil: Acompanhamento da Safra 2011/12 Centro Sul.** Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA., Piracicaba: Universidade de São Paulo - USP Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia, 2012.

PIEWTHONGNGAM, K.; PATHUMNAKUL, S.; SETTHANAN, K. Application of crop growth simulation and mathematical modeling to supply chain management in the Thai sugar industry. **Agricultural Systems**, v. 102, n. 1-3, p. 58-66, Oct. 2009.

PISSINGER, D.; ROPKE, S. A general heuristic for vehicle routing problems. **Computers and Operations Research**, v. 34, n. 8, p. 2403-2435, 2007.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production Planning by Mixed Integer Programming.** New York: Springer Science+Business Media, Inc, 2006.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Encarte técnico IPNI**, v. 110, p. 12-17, 2005.

PUREZA, V.; MORABITO, R.; REIMANN, M. Vehicle routing with multiple deliverymen: modeling and heuristic approaches. **European Journal of Operations Research**, v. 218, n. 3, p. 636-647, May, 2012.

RIPOLI, T. C.; PARANHOS, S. B. Sistemas de colheita. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargil, 1987.

ROCHA, P. L.; RAVETTI, M. G.; MATEUS, G. R.; PARDALOS, P. M. Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 4, p. 1250 – 1264, Apr. 2008.

ROSENTHAL, R. E. **GAMS - A User's Guide.** Washington: GAMS Development Corporation, 2008.

SAHLING, F.; BUSCHKÜHL, L.; TEMPELMEIER, H.; HELBER, S. Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 9, p. 2546-2553, Sep. 2009.

SALASSI, M. E.; BREAUX, J. B.; NAQUIN, C. J. Modeling within-season sugarcane growth for optimal harvest system selection. **Agricultural Systems**, v. 36, n. 9, p. 261-278, Sep. 2002.

SALOMON, M.; SOLOMON, M. M.; VAN WASSENHOVE, L. N.; DUMAS, Y. DAUZÈRE-PÉRÈS, S. Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence

dependent set-up costs and set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 100, n. 3, p. 494-513, Aug. 1997.

SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, v. 63, n. 1, p. 1-12, Aug. 2012.

SARTORI, M. M. P.; FLORENTINO, H. O.; BASTA, C.; LEÃO, A. L. Determination of the optimal quantity of crop residues for energy in sugarcane crop management using linear programming in variety selection and planting strategy. **Energy**, v. 26, n. 11, p. 1031-1040, Nov. 2001.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Optimized agricultural planning of sugarcane using linear programming. **Revista Investigacion Operacional**, v. 31, n. 2, p. 126-132, 2010.

SEEANNER, F.; ALMADA-LOBO, B. MEYR, H. Combining the principles of variable neighborhood decomposition search and the fix&optimize heuristic to solve multi-level lot-sizing and scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 1, p. 303-317, Jan. 2013.

SEGLE, E., e P. SANDERS. Accreditation. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ... Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY**, 1992. p. V-1 a V-13.

SILVA, J. E. A. R.; ALVES, M. R. P. A.; COSTA, M. A. B. Work shift planning: an approach to the sugarcane sector using discrete simulation. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 1, p. 73-90, 2011.

SILVER, E. A.; VIDAL, R. V. V.; WERRA, D. A tutorial on heuristic methods. **European Journal of Operational Research**, v. 5, n. 3, p. 153 - 162, Sep. 1980.

SILVER, E. A. An overview of heuristic solution methods. **Journal of Operational Research Society**, v. 55, p. 936-956, May 2004.

SINGH, G.; PATHAK, B. K. A decision support system for mechanical harvesting and transportation of sugarcane in Thailand. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 11, n. 2-3, p. 173-182, Nov. 1994.

SINGH, S.; SINGH, M.; RAO, G. P.; SOLOMON, S. VERNA, A. P. Effect of distillery spent wash on growth, tillering and biomass yield of sugarcane. **Sugar Tech**, v. 9, n. 4, p. 249-255, 2007.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2a. edição. São Paulo-SP: Ed. Atlas, 2002.

SMITH, J. H. Modeling muddles: Validation beyond the numbers. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p. 235-249, Apr. 1993.

SOLOMON, M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations Research**, v. 35, n. 2, p. 254-265, Mar.-Apr. 1987.

SOUZA, R. J. **A logística como instrumento de reestruturação, redução de custos e melhorias na qualidade em Agroindústrias. Uma aplicação ao setor sucroalcooleiro.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação da Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

STRAY, B. J.; VAN VUUREN, J. H.; BEZUIDENHOUT, C. N. An optimisation-based seasonal sugarcane harvest scheduling decision support system for commercial growers in South Africa. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 83, p. 21-31, Apr. 2012.

STUPIELLO, J. P. Cana como matéria prima. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: Cultivo e Utilização**. Campinas: Fundação Cargil, 1987.

TILANUS, C. B. Failures and successes of quantitative methods in management. **European Journal of Operational Research**, v. 19, n. 2, p. 170-175, Feb. 1985.

TOLEDO, C. F. M.; OLIVEIRA, L.; PEREIRA, R. F.; FRANÇA, P. M.; MORABITO, R. A genetic algorithm/mathematical programming approach to solve a two-level soft drink production problem. **Computers & Operations Research**, v. 48, p. 40–52, Aug. 2014.

TOLEDO, F. M. B.; ARMENTANO, V. A. A Lagrangian-based heuristic for the capacitated lot-sizing problem in parallel machines. **European Journal of Operational Research**, v. 175, n. 2, p. 1070–1083, Dec. 2006.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. R. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 3, p. 813–821, Oct. 2009.

TOSO, E. A. V. **Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de suplementos para nutrição animal**. Tese de doutorado apresentada ao DEP-UFSCar, São Carlos, 2008.

UNICA. **Etanol e Bioeletricidade. A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo: Gráficos Burti, 2009.

VASCO, R. A. **Otimização na alocação dinâmica de veículos no transporte rodoviário de cargas completas entre terminais**. Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

VASCO, R. A.; MORABITO, R. Otimização na alocação dinâmica de veículos no transporte rodoviário de cargas completas entre terminais. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 2, p. 271-284, Jun. 2014.

VIJAYALAKSHMI, B. An application of multi-objective modeling: The case of the Indian sugar industry. **European Journal of Operational Research**, v. 28, n. 2, p. 146-153, Feb. 1987.

WAGNER, B. J.; DAVIS, D. J. A search heuristic for the sequence-dependent economic lot scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 141, n. 1, p. 133–146, Aug. 2002.

WAGNER, H. M.; WHITIN, T. M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, v. 5, n. 1, p. 89-96, 1958.

WILLIAMS, M. L., e J. J. SILKORA. Overview. In: SIMULATION VALIDATION WORKSHOP PROCEEDINGS (SIMVAL II), 1992, Alexandria, Virginia. **Anais ...** Alexandria, Virginia: MILITARY OPERATIONS RESEARCH SOCIETY, 1992. p. I1 a I6.

WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. New York: JOHN WILEY & SONS, 1998.

XAVIER, C. E. O. **Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil: aplicação de um modelo matemático de otimização**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. Aplicação dos conceitos de modelagem e de redes de Petri na análise do processo produtivo da indústria sucroalcooleira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 809-820, jun. 2002.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; MUSCAT, A. R. N.; BIAZZI, J. L. Decentralizing Ethanol Distribution in Southeastern Brazil. **Interfaces**, v. 26, n. 6, p. 24-34, Nov.-Dec. 1996.

ZANAKIS, S. H.; EVANS, J. R.; VAZACOPOULOS, A. A. Heuristic methods and applications: A categorized survey. **European Journal of Operational Research**, v. 43, n. 1, p. 88-110, Nov. 1989.

ZHU, X.; WILHELM, W. E. Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review. **IIE Transactions**, v. 38, n. 11, p. 987-1007, 2006.

Apêndices

Apêndice A: Revisão da literatura de VRP

Conforme mencionado anteriormente, o VRP pode ser definido como o projeto de rotas otimizadas de coleta ou entrega de um ou mais depósitos a um conjunto de cidades ou clientes dispersos geograficamente, sujeito a restrições adicionais (LAPORTE, 1992). A revisão deste tema é resumida a seguir, pois se trata da primeira tentativa de modelagem do modelo conceitual apresentado na seção 2.6 através do VRPTWSD (Problema de roteamento de veículos com janelas de tempo e entrega fracionada) proposto por Belfiore e Yoshizaki (2009). No entanto, no decorrer da pesquisa, a modelagem por meio do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes se mostrou mais promissora, apesar do desenvolvimento de um modelo matemático através de VRP ter potencial para pesquisa futura.

Como o VRP é um problema amplamente estudado e dá margem à inserção de vários tipos de variações e restrições, há na literatura uma classificação destas variações. As mais relevantes para o problema em estudo são brevemente discutidas a seguir, como uma tentativa de tratar o modelo conceitual (BODIN *et al.* 1983; GOLDEN *et al.* 1984; SOLOMON 1987; DROR; TRUDEAU, 1989; DESROCHERS *et al.* 1992; LAPORTE, 1992; LAPORTE *et al.*, 2000). A revisão foi organizada partindo do problema mais simples, uma abordagem possível do problema do caixeiro viajante dentre as várias existentes na literatura, ao mais complexo e mais próximo do modelo conceitual, o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo, frota heterogênea e entrega fracionada.

Problema do caixeiro viajante TSP (*Traveling Salesman Problem*)

O problema do caixeiro viajante é um dos problemas mais estudados na literatura de otimização combinatória e da pesquisa operacional, e pode ser considerado um caso particular do VRP clássico, em que só há um veículo e sem restrições adicionais (BODIN *et al.*, 1983). Este problema já é um problema NP-difícil e pertence à classe dos problemas de roteamento em nós, que podem ser definidos em grafos orientados ou não orientados (ARENALES *et al.*, 2007). A variável de decisão, que é binária, define se o caixeiro viaja da cidade i para j ou não. O objetivo do problema é minimizar o deslocamento total do caixeiro. A primeira restrição que este tipo de problema está sujeito é que o caixeiro deve sair de toda cidade que entrou. Além desta restrição, deve-se evitar a formação de sub-

rotas. Esta última restrição em geral acaba sendo computacionalmente custosa para este tipo de problema.

VRP clássico

Para definir o VRP, Laporte (1992) considera um grafo $G = (V, A)$, em que $V = \{0, \dots, n\}$ são os vértices desse grafo, representando nós, cidades, clientes (ou no caso do presente estudo, blocos de colheita), com o depósito localizado no vértice 0, e A é o conjunto de arcos (i, j) desse grafo, sendo $i \neq j$, que ligam os vértices entre si e estão associados a uma matriz não negativa $C = (c_{i,j})$. O valor $c_{i,j}$ pode ser interpretado como distância, custo ou tempo de trajeto do arco (i, j) . Além disso, considera-se que há m veículos (aqui seriam as frentes de colheita disponíveis) sediados no depósito. No presente trabalho, as frentes de colheita podem iniciar seu roteiro em outros locais, não necessariamente no depósito. O número de veículos pode variar de acordo com o intervalo $m_i \leq m \leq m_s$. Se $m_i = m_s$, então o número de veículos é fixo. Por outro lado, se $m_i = 1$ e $m_s = n - 1$, o número de veículos é livre. O problema consiste em obter a rota de mínimo custo que:

- i. Visite cada vértice, com exceção do depósito, exatamente uma vez por um único veículo.
- ii. Todos os roteiros dos veículos comecem e terminem no depósito. No presente estudo, se for necessário, a distância entre os blocos de colheita e o depósito pode ser zero.
- iii. Atenda restrições adicionais.

O VRP com frota fixa de m veículos e sem restrições adicionais pode ser visto como um m-TSP (LARSON; ODoni, 1981), também NP-difícil. A mesma restrição que evita a formação de sub-rotas também é bastante custosa neste tipo de problema. As formulações do problema podem ter as variáveis de decisão com dois índices (i, j) , especialmente nos casos de frota homogênea, que neste caso se assemelha mais à formulação do m-TSP, com um número menor de variáveis, ou com três índices, (i, j, k) , onde k indica o k -ésimo veículo, quando a frota é heterogênea.

Caso cada vértice tenha uma demanda d_i e cada veículo tenha uma capacidade D (frota homogênea) de absorver esta demanda, o problema passa a ser capacitado, chamado CVRP (*Capacity-Constrained Vehicle Routing Problem*). Caso a capacidade dos veículos seja diferenciada, D_k , o problema passa a ter frota heterogênea, HFVRP. Se ao invés de minimizar a distância percorrida, o objetivo da resolução do VRP for determinar o tamanho e

composição da frota, esta variação é tratada como o FSMVRP (*Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem*).

Se houver uma restrição de distância, tempo ou custo máximo a ser obedecido, o problema passa a ter uma restrição de distância total DVRP (*Time-or-Distance-Constrained Vehicle Routing Problem*). Outra variação do VRP está relacionada à inclusão de múltiplos depósitos, MDVRP (*Multi-Depot Vehicle Routing Problem*).

No caso aqui estudado, a analogia de uma usina com um depósito não é direta, pois as frentes não necessitam iniciar seu roteiro na usina. Quando a usina começa sua operação, as frentes de colheita já podem estar posicionadas nos blocos de colheita, bem como no caso de multi-unidades, em qualquer momento da safra, elas podem mudar a unidade fabril para a qual estão colhendo a matéria-prima.

VRP com janelas de tempo

De acordo com Solomon (1987), Desrochers *et al.* (1992), Gendreau *et al.* (1999), Bräysy e Gendreau (2005a), Bräysy e Gendreau (2005b), neste tipo de problema, VRPTW, além de c_{ij} , a cada arco associa-se t_{ij} , que representa o tempo gasto no percurso entre os nós i e j . Nesta abordagem, o tempo de visita ao nó i pode estar incluído em t_{ij} ou ser desconsiderado. Além disso, cada vértice possui uma janela de tempo para ser visitado, $[a_i, b_i]$. O veículo não pode iniciar serviço depois de b_i e se chegar antes de a_i , deve esperar para iniciar serviço. A janela de tempo do vértice do depósito $[a_0, b_0]$ e $[a_{n+1}, b_{n+1}]$, representa o horizonte de tempo máximo do planejamento. O modelo passa a ter, além da variável de decisão x_{ijk} , que define se o veículo k percorre o arco (i, j) , a variável s_{ik} , que define quando o veículo k inicia serviço no vértice i . Com a inclusão das restrições associadas à janela de tempo, as restrições que inibem a formação de sub-rotas do caixeiro viajante tornam-se desnecessárias (KALLEHAUGE *et al.*, 2005).

Segue abaixo uma formulação do VRPTW com três índices (KALLEHAUGE *et al.*, 2005).

$$\text{Min } \sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} \quad (109)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=0}^{n+1} \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, \quad (i = 1, \dots, n), i \neq j \quad (110)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i \sum_{j=0}^{n+1} x_{ijk} \leq D, \quad (k = 1, \dots, m) \quad (111)$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} x_{0jk} = 1, \quad (k = 1, \dots, m) \quad (112)$$

$$\sum_{i=0}^{n+1} x_{ihk} - \sum_{j=0}^{n+1} x_{hjk} = 0, \quad (k = 1, \dots, m), (h = 1, \dots, n) \quad (113)$$

$$\sum_{i=0}^{n+1} x_{in+1k} = 1, \quad (k = 1, \dots, m) \quad (114)$$

$$s_{ik} + t_{i,j} - M(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk}, \quad (i, j = 0, \dots, n + 1), (k = 1, \dots, m) \quad (115)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i, \quad (i, j = 0, \dots, n + 1), (k = 1, \dots, m) \quad (116)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i, j = 0, \dots, n + 1), (k = 1, \dots, m) \quad (117)$$

A função objetivo (109) minimiza a distância (ou custo) total percorrida pelos veículos. As equações (110) garantem que cada cliente será atendido por um veículo. As restrições (111) limitam os nós visitados à capacidade dos veículos. As equações (112) impõem que os veículos saiam do depósito. As equações (113) garantem que em todo nó h haja um veículo que chegue nele e saia dele. As equações (114) impõem que os veículos terminem o roteiro no depósito. Para o k -ésimo veículo que chegou no nó j , as inequações (115) definem que o momento de início do seu atendimento no nó j , s_{jk} , será maior ou igual ao momento do início do seu atendimento do nó i , mais o tempo do seu deslocamento no arco (i, j) , que pode incluir ou não o tempo de visitação do nó i . O valor M é um número suficientemente grande para garantir que apenas os nós visitados pelo k -ésimo veículo possuam valores válidos de s . Note que esta restrição implica que pode haver espera do veículo no cliente antes de iniciar o serviço. No caso da analogia do veículo com a frente de colheita, esta possibilidade é indesejável, pois a espera da frente para iniciar a colheita após ter chegado a um bloco pode comprometer o suprimento da unidade fabril. Esta restrição (115) também elimina as sub-rotas. As restrições (116) limitam a passagem do k -ésimo veículo ao intervalo de tempo estabelecido pelo cliente i . As expressões (117) caracterizam as variáveis binárias, x_{ijk} , envolvidas no modelo.

VRP com entrega fracionada

Dror e Trudeau (1989), Dror *et al.* (1994), Belfiore e Yoshizaki (2009) estudaram este tipo de modelo, VRPSDTW (*Vehicle Routing Problem with Split Delivery and Time Window*), em que mais de um veículo pode visitar o mesmo vértice, ou ainda, o mesmo veículo pode visitar duas ou mais vezes o vértice em momentos diferentes. Fracionar a carga permite, por exemplo, atender a um cliente cuja demanda é superior à capacidade do veículo. Este tipo de abordagem parece ser adequada para o sequenciamento das frentes de colheita, pois caso uma frente não possa dar continuidade à colheita de algum bloco, devido ao decréscimo da colheitabilidade ou da capacidade de transporte, ela pode deixá-lo pela metade e ir atender outro bloco que reequilibre as condições mencionadas, contanto que este deslocamento adicional da frente seja penalizado.

Belfiore e Yoshizaki (2009) estudaram uma formulação para este problema com uma frota heterogênea e ilimitada. Neste caso, k representa o tipo de veículo, ao invés do veículo. Quanto há entrega fracionada, é adicionada outra variável de decisão, y_{ik} , representando a fração da demanda do nó i atendida pelo k -ésimo tipo de veículo. Segue abaixo o modelo estudado por estes autores utilizando as notações adotadas nesta seção:

$$\text{Min } \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} \quad (118)$$

Sujeito a

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (119)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i y_{ik} \leq D_k, \quad (k = 1, \dots, m) \quad (120)$$

$$y_{ik} \leq \sum_{j=0}^n x_{ijk}, \quad (k = 1, \dots, m), (i = 1, \dots, n) \quad (121)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, \quad (k = 1, \dots, m) \quad (122)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ihk} - \sum_{j=0}^n x_{hjk} = 0, \quad (k = 1, \dots, m), (h = 0, \dots, n) \quad (123)$$

$$s_{ik} + t_{i,j} - M(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk}, \quad (i, j = 0, \dots, n), (k = 1, \dots, m) \quad (124)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i, \quad (i, j = 0, \dots, n), (k = 1, \dots, m) \quad (125)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i, j = 0, \dots, n), (k = 1, \dots, m) \quad (126)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad (i = 0, \dots, n), (k = 1, \dots, m) \quad (127)$$

A função objetivo (118) minimiza a distância total percorrida pelos veículos. Belfiore e Yoshizaki (2009) ainda consideram uma parcela adicional na função objetivo que minimiza o custo fixo do veículo k visitar o nó i . A equação (119) garante que cada cliente será integralmente atendido. As restrições (120) limitam os nós visitados à capacidade da frota de veículos, podendo variar de acordo com cada tipo de veículo. As restrições (121)

garantem que não haverá qualquer fração da demanda de nó i atendida pelo k -ésimo veículo sem que haja o deslocamento deste veículo passando por i e com destino a um nó j qualquer. As equações (122) impõem que os veículos saiam do depósito. As equações (123) garantem que em todo nó h haja pelo menos um veículo que chegue a ele e saia dele. As restrições (124) possuem a mesma função das restrições (115) explicada na seção anterior. Esta condição não é viável para o problema em questão, pois uma frente de colheita pode colher parte de um bloco e voltar posteriormente, desde que isso seja necessário para manter a factibilidade das restrições de capacidade de colheita e transporte. As expressões (125) limitam a passagem do k -ésimo veículo ao intervalo de tempo estabelecido pelo cliente i . As expressões (126) caracterizam as variáveis binárias, x_{ijk} , envolvidas no modelo e as restrições (127) caracterizam a não negatividade da variável y_{ik} .

Métodos de solução do VRP

A resolução exata do VRP e suas variantes é um desafio para problemas de grande porte, como se espera que seja no presente estudo. Há uma vasta literatura sobre métodos exatos e aproximados de solução para VRP e suas variantes. Alguns exemplos incluem modificações propostas nos algoritmos de varredura, de economias de Clark e Wright, e de Solomon (LARSON; ODONI, 1981). Meta-heurísticas, como Busca Tabu, algoritmos genéticos e ACO (*Ant Colony Optimization*), vêm sendo aplicados com certo êxito nas resoluções de VRP de grande porte (LAPORTE, 1992). Por exemplo, Belfiore e Yoshizaki (2009) utilizaram *Scatter Search* para a resolução de um VRPSD de grande porte, e Pureza *et al.* (2012) utilizaram busca tabu e colônia de formigas (ACO) para uma variação do VRP com entregadores extra, entre muitos outros trabalhos da literatura.

Apêndice B: Modelo proposto baseado no VRPSDTW

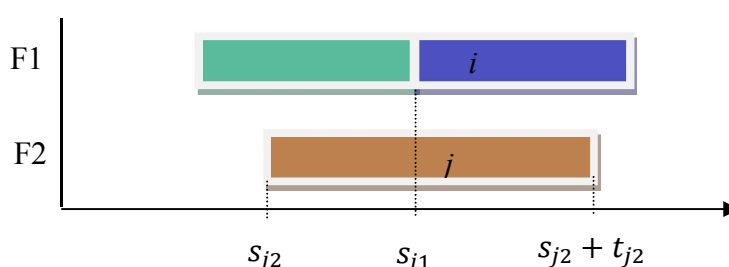
Conforme mencionado anteriormente, investigou-se primeiramente uma possível modelagem inspirada no VRPSDTW para representar o problema do roteamento das frentes de colheita. Os veículos seriam as frentes de colheita, os clientes seriam os blocos de colheita e as janelas de tempo representariam as restrições de períodos de colheita abordadas na seção 3.2 e no Apêndice A.

A maior dificuldade encontrada foi na forma de tratar as restrições de capacidade de colheita e transporte. Estas capacidades são atributos de cada bloco de colheita calculados conforme as formulações apresentadas nas seções 2.2.3 e 2.2.4.3. É desejável que o somatório destas capacidades tenha máxima constância ao longo de uma safra. Desta forma, a necessidade de equipamentos (colhedoras e caminhões) não se altera, aumentando, assim, a utilização dos recursos, reduzindo custos fixos, e minimizando o risco de falha no suprimento de matéria-prima.

Primeiramente, pensou-se que estas capacidades deveriam ser consideradas pelo modelo em cada instante de tempo que a frente de colheita mudasse de bloco. Entretanto, apesar de ser vasta a literatura do VRP, não foi encontrado nenhum equacionamento que pudesse ser diretamente aplicado para este tipo de análise. Assim, pensou-se na seguinte dedução de uma formulação apresentada a seguir.

No Gráfico 34 o instante de tempo s_{j2} representa o momento em que a frente 2 inicia o processamento do bloco j , consumindo t_{j2} unidades de tempo para sua conclusão. Similarmente, o instante de tempo s_{i1} representa o momento em que a frente 1 inicia o processamento do bloco i . Assim, o modelo deveria considerar, no instante s_{i1} , as capacidades de colheita e transporte com essas duas frentes 1 e 2 colhendo os blocos i e j . Conforme mostrado no Apêndice A, variáveis considerando o tempo contínuo como s_{i1} e s_{j2} são facilmente representadas em modelos de roteirização com janelas de tempo, como o VRPTW e VRPSDTW.

Gráfico 34: Tempos de processamento dos blocos pelas frentes



A partir do Gráfico 34, deduz-se para esta situação que:

$$s_{j2} \leq s_{i1} \leq s_{j2} + t_{j2} \quad (128)$$

Ou então,

$$s_{j2} - s_{i1} \leq 0 \text{ e} \quad (129)$$

$$s_{j2} + t_{j2} - s_{i1} \geq 0 \quad (130)$$

Sejam as variáveis de decisão:

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } s_{i1} - s_{j2} \geq 0, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } s_{j2} + t_{j2} - s_{i1} \geq 0, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } s_{i1} - s_{j2} \geq 0 \text{ e } s_{j2} + t_{j2} - s_{i1} \geq 0, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

ou seja, a variável z_{ij} indica se a situação do Gráfico 34 está ocorrendo ou não. Dessa forma, para relacionar as inequações (128) e (129) com as variáveis u_{ij} , v_{ij} e z_{ij} , as seguintes restrições são necessárias:

$$s_{j2} - s_{i1} \leq M(1 - u_{ij}) \quad \forall i, j \quad (131)$$

$$s_{j2} - s_{i1} \geq -Mu_{ij} \quad \forall i, j \quad (132)$$

$$s_{j2} + t_{j2} - s_{i1} \geq -M(1 - v_{ij}) \quad \forall i, j \quad (133)$$

$$s_{j2} + t_{j2} - s_{i1} \leq Mv_{ij} \quad \forall i, j \quad (134)$$

$$z_{ij} \geq u_{ij} + v_{ij} - 1 \quad \forall i, j \quad (135)$$

$$z_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall i, j \quad (136)$$

$$z_{ij} \leq v_{ij} \quad \forall i, j \quad (137)$$

em que M é um número suficientemente grande. A condição (128) está relacionada com a variável u_{ij} e com as restrições (131) e (132). Já a condição (129) está relacionada com a variável v_{ij} e com as restrições (133) e (134). As restrições (135), (136) e (137) relacionam as variáveis u_{ij} , v_{ij} e z_{ij} . A Tabela 50 mostra três cenários para supostos valores de s_{i1} , s_{j2} e t_{j2} , bem como o resultado desejado da variável z_{ij} para representar a colheita simultânea dos blocos i e j pelas frentes 1 e 2. No cenário 1, a colheita do bloco i pela frente 1 começa antes do término da colheita do bloco j pela frente 2, havendo, portanto, colheita simultânea de i com j . No cenário 2 a colheita do bloco i pela frente 1 começa antes do início da colheita do

bloco j pela frente 2. Neste caso, pode até haver colheita simultânea do bloco j com i , todavia nos interessa a colheita simultânea de i com j e não de j com i , por questões de simetria de z_{ij} . Já no cenário 3, a colheita do bloco i pela frente 1 começa depois do término da colheita do bloco j pela frente 2. Portanto, não há colheita simultânea de i com j nem de j com i .

Tabela 50: Avaliação do valor desejado de z_{ij}

Cenário	s_{j2}	s_{i1}	t_{j2}	$s_{j2} + t_{j2}$	Resultado
1	20	25	20	40	$z_{ij} = 1$
2	20	10	20	40	$z_{ij} = 0$
3	20	50	20	40	$z_{ij} = 0$

A Tabela 51 mostra a substituição dos valores da Tabela 50 nas inequações (131) e (132) para avaliar u_{ij} .

Tabela 51: Avaliação de u_{ij} .de acordo com as restrições (131) e (132)

Cenário	$s_{j2} - s_{i1}$	$\leq M(1 - u_{ij})$	$\geq -Mu_{ij}$	Resultado
1	-5	0 ou M	-M	$u_{ij} = 1$
2	10	M	0 ou -M	$u_{ij} = 0$
3	-30	0 ou M	-M	$u_{ij} = 1$

Da mesma forma, a Tabela 52 mostra a substituição dos valores da Tabela 50 nas inequações (133) e (134) para avaliar v_{ij} .

Tabela 52: Avaliação de v_{ij} .de acordo com as restrições (133) e (134)

Cenário	$s_{j2} + t_{j2} - s_{i1}$	$\geq -M(1 - v_{ij})$	$\leq Mv_{ij}$	Resultado
1	15	0 ou -M	M	$v_{ij} = 1$
2	30	0 ou -M	M	$v_{ij} = 1$
3	-10	-M	0 ou M	$v_{ij} = 0$

Já a Tabela 53 mostra os resultados u_{ij} e v_{ij} relacionados com z_{ij} através das inequações (135), (136) e (137).

Tabela 53: Avaliação de z_{ij} .de acordo com as restrições (135), (136) e (137)

Cenário	u_{ij}	v_{ij}	$u_{ij}+v_{ij} - 1$	(135)	(136)	(137)	Resultado
1	1	1	1	1	0 ou 1	0 ou 1	$z_{ij} = 1$
2	0	1	0	0 ou 1	0	0 ou 1	$z_{ij} = 0$
3	1	0	0	0 ou 1	0 ou 1	0	$z_{ij} = 0$

Assim, como mostra a Tabela 53, o sistema de restrições (131) a (137) consegue garantir o resultado esperado de z_{ij} apresentado na Tabela 50. Entretanto, para que esta abordagem seja genérica o suficiente para tratar diversas frentes de colheita, a cada frente que fosse adicionada ao modelo, novas restrições semelhantes a (131) a (137) deveriam ser adicionadas. Além disso, a variável z_{ij} teria que incorporar mais índices, aumentando de maneira substancial o mínimo de variáveis e restrições do problema. Embora seja possível a extensão das deduções acima para representar situações mais genéricas, considerou-se mais promissor nesta pesquisa avaliar as capacidades dos recursos de colheita e transporte agregados em macroperíodos. Sendo assim, a literatura do GLSP é bastante rica no tratamento de macroperíodos e motivou a mudança de abordagem na modelagem do problema.

Apêndice C: Dados dos blocos agregados

Instância A1

	Produção (t)	fração	Col. (t/h)	Transp. (t/h)
		mec	mec	mec
b01	1.706	1,00	25,3	46,2
b02	2.975	1,00	35,2	31,6
b03	11.365	1,00	30,9	29,0
b04	4.446	1,00	28,3	20,9
b05	13.717	1,00	28,6	36,5
b06	13.469	1,00	39,7	30,6
b07	2.784	1,00	28,2	29,4
b08	5.824	1,00	29,8	25,7
b09	19.294	1,00	23,6	25,4
b10	3.588	1,00	16,6	25,7
b11	380	1,00	7,4	23,5
b12	3.336	1,00	22,0	24,6
b13	8.176	1,00	32,7	23,3
b14	8.500	1,00	32,5	22,3
b15	70.439	1,00	42,6	20,5
b16	16.153	1,00	35,4	20,9
b17	8.170	1,00	23,6	22,3
b18	12.353	1,00	25,9	37,5
b19	960	1,00	24,5	24,7
b20	7.864	1,00	48,9	27,7
b21	16.048	1,00	35,7	43,4
b22	71.842	1,00	28,9	37,0
b23	53.176	1,00	31,2	37,0
b24	53.485	1,00	39,3	39,0
b25	23.026	1,00	35,3	31,6
b26	6.129	1,00	34,7	30,6
b27	29.212	1,00	36,5	28,2
b28	13.296	1,00	26,5	29,2
b29	25.551	1,00	27,6	27,0
b30	6.775	1,00	26,5	27,3
b31	91.733	1,00	24,6	27,1
b32	15.783	1,00	27,6	25,6
b33	4.018	1,00	18,2	25,9
b34	52.057	1,00	24,0	25,3
b35	6.018	1,00	25,3	23,3
b36	13.563	1,00	22,4	24,6
b37	20.556	1,00	8,3	23,9
b38	23.841	1,00	28,9	23,3
b39	121.233	1,00	35,8	21,0
b40	18.059	1,00	36,5	21,5
b41	28.831	1,00	29,9	20,4

	Produção	fração	Col. (t/h)	Transp. (t/h)
	(t)	mec	mec	mec
b42	5.461	1,00	30,8	20,6
b43	2.477	1,00	20,7	19,1
b44	5.277	1,00	29,4	25,7
b45	267	1,00	30,9	46,2
b46	8.386	1,00	24,7	41,4
b47	15.143	1,00	33,7	37,5
b48	6.980	1,00	24,5	24,8
b49	9.547	1,00	38,6	42,4
b50	48.454	1,00	26,8	34,0
b51	2.552	1,00	16,5	35,3
b52	102.525	1,00	40,5	35,2
b53	6.985	1,00	34,2	31,6
b54	1.183	1,00	35,3	30,6
b55	37.446	1,00	42,8	28,4
b56	10.872	1,00	27,5	29,0
b57	3.183	1,00	42,8	26,7
b58	35.075	1,00	28,7	25,7
b59	8.217	1,00	23,0	23,3
b60	3.924	1,00	40,5	25,2
b61	13.088	1,00	36,6	22,3
b62	21.484	1,00	25,2	21,8
b63	14.683	1,00	28,2	20,9
b64	4.410	1,00	28,3	20,6
b65	437	1,00	48,9	27,7
b66	19.021	1,00	23,7	39,4
b67	10.279	1,00	36,9	38,9
b68	48.096	1,00	35,8	32,6
b69	6.196	1,00	34,7	30,6
b70	11.291	1,00	24,7	29,5
b71	3.434	1,00	41,2	28,8
b72	2.334	1,00	26,9	28,0
b73	8.293	1,00	22,9	27,3
b74	12.364	1,00	19,5	23,3
b75	9.260	1,00	7,4	23,5
b76	1.932	1,00	24,7	24,6
b77	19.635	1,00	30,3	21,6
b78	3.273	1,00	31,8	20,3
b79	61.928	1,00	59,8	23,3
b80	23.257	1,00	47,3	33,0
b81	42.363	1,00	40,6	33,5
b82	177.583	1,00	55,3	36,8
b83	23.086	1,00	48,4	31,6
b84	15.679	1,00	58,6	30,6
b85	61.371	1,00	58,1	27,9
b86	12.849	1,00	50,4	27,3
b87	70.882	1,00	48,9	26,6
b88	4.188	1,00	43,5	27,3
b89	2.323	1,00	44,8	26,1
b90	25.080	1,00	56,6	23,3
b91	5.460	1,00	53,3	23,3
b92	99.082	1,00	49,9	21,3
b93	33.428	1,00	53,6	20,9

Instância B1

	Produção (t)	fração		Col. (t/h)		Transp. (t/h)		Produtividade (t/ha)	Fração Irrig.
		man	mec	man	mec	man	mec		
b001	1.894	0,00	1,00	32,1	42,5	0,1	12,8	96	0,0
b002	2.000	0,00	1,00	32,1	37,1	0,1	12,8	96	0,0
b003	1.039	0,00	1,00	32,1	38,5	0,1	12,8	96	0,0
b004	1.697	1,00	0,00	32,1	0,1	17,5	0,1	54	0,0
b005	1.934	1,00	0,00	32,1	0,1	16,7	0,1	64	0,0
b006	4.571	1,00	0,00	32,1	0,1	13,3	0,1	52	0,0
b007	2.115	0,00	1,00	32,1	47,8	0,1	18,7	85	0,0
b008	6.274	0,00	1,00	32,1	57,3	0,1	22,2	119	0,0
b009	1.346	1,00	0,00	32,1	0,1	29,4	0,1	65	0,0
b010	1.940	0,00	1,00	32,1	57,7	0,1	22,3	100	0,0
b011	760	1,00	0,00	32,1	0,1	16,4	0,1	81	1,0
b012	1.828	1,00	0,00	32,1	0,1	14,4	0,1	47	0,4
b013	5.053	1,00	0,00	32,1	0,1	15,9	0,1	73	0,7
b014	1.992	0,00	1,00	32,1	40,2	0,1	13,7	82	0,0
b015	1.932	1,00	0,00	32,1	0,1	13,7	0,1	64	0,0
b016	3.149	0,00	1,00	32,1	73,0	0,1	13,1	137	0,0
b017	1.484	0,00	1,00	32,1	50,8	0,1	12,6	88	0,0
b018	6.648	0,38	0,62	32,1	57,2	24,7	24,7	109	0,0
b019	9.834	0,00	1,00	32,1	46,8	0,1	21,9	71	0,0
b020	7.470	0,00	1,00	32,1	58,1	0,1	14,4	123	0,0
b021	1.202	0,00	1,00	32,1	42,6	0,1	12,6	82	0,0
b022	5.170	0,00	1,00	32,1	56,2	0,1	24,7	103	0,0
b023	40.571	0,00	1,00	32,1	46,4	0,1	30,0	85	0,0
b024	34.861	0,00	1,00	32,1	50,1	0,1	29,1	96	0,0
b025	15.935	0,00	1,00	32,1	54,5	0,1	30,2	97	0,0
b026	14.649	0,00	1,00	32,1	41,6	0,1	31,3	81	0,0
b027	57.768	0,03	0,97	32,1	47,0	59,8	33,5	86	0,1
b028	23.612	0,14	0,86	32,1	57,3	30,4	35,9	101	0,3
b029	19.365	0,27	0,73	32,1	49,0	30,9	36,7	97	0,0
b030	8.534	0,68	0,32	32,1	62,3	30,6	32,7	108	0,0
b031	18.429	0,50	0,50	32,1	44,4	30,4	45,7	79	0,8
b032	12.738	0,50	0,50	32,1	57,0	30,4	48,6	97	0,5
b033	8.246	0,55	0,45	32,1	43,6	18,5	29,2	89	0,2
b034	19.308	0,58	0,42	32,1	41,2	19,9	30,2	99	0,1
b035	13.924	0,71	0,29	32,1	43,8	26,8	27,7	80	0,0
b036	3.447	0,39	0,61	32,1	42,3	26,2	26,9	76	0,0
b037	32.878	0,29	0,71	32,1	44,2	25,3	32,5	85	0,6
b038	5.529	1,00	0,00	32,1	0,1	22,0	0,1	101	0,5
b039	5.754	0,12	0,88	32,1	40,6	17,7	30,4	85	0,3
b040	12.999	0,81	0,19	32,1	46,3	19,8	29,0	103	0,3
b041	5.089	1,00	0,00	32,1	0,1	20,5	0,1	82	0,1
b042	6.581	0,72	0,28	32,1	40,1	25,4	25,4	87	0,0
b043	5.193	0,35	0,65	32,1	32,4	25,0	15,9	77	0,7
b044	1.673	1,00	0,00	32,1	0,1	14,7	0,1	106	0,0
b045	3.019	0,59	0,41	32,1	55,6	17,0	17,0	90	0,0

	Produção (t)	fração		Col. (t/h)		Transp. (t/h)		Produtividade (t/ha)	Fração Irrig.
		man	mec	man	mec	man	mec		
b046	5.293	1,00	0,00	32,1	0,1	17,0	0,1	90	0,0
b047	4.070	0,06	0,94	32,1	45,3	17,0	32,5	101	0,0
b048	8.688	0,30	0,70	32,1	40,5	17,0	17,0	88	0,0
b049	3.189	1,00	0,00	32,1	0,1	12,8	0,1	75	0,0
b050	2.925	0,33	0,67	32,1	48,6	14,6	17,0	81	0,0
b051	11.490	1,00	0,00	32,1	0,1	14,7	0,1	75	0,0
b052	5.169	0,69	0,31	32,1	39,7	14,0	14,4	80	0,0
b053	9.527	0,14	0,86	32,1	43,7	12,3	14,2	81	0,0
b054	10.212	0,15	0,85	32,1	42,9	13,7	13,6	82	0,0
b055	9.256	0,12	0,88	32,1	43,1	14,0	13,4	88	0,0
b056	2.058	1,00	0,00	32,1	0,1	12,8	0,1	64	0,0
b057	9.129	0,00	1,00	32,1	64,9	0,1	12,9	134	0,0
b058	1.235	0,00	1,00	32,1	48,0	0,1	12,6	82	0,0
b059	2.710	1,00	0,00	32,1	0,1	14,8	0,1	66	0,0
b060	43.807	0,04	0,96	32,1	44,6	20,8	29,5	82	0,0
b061	4.942	0,00	1,00	32,1	48,5	0,1	27,0	101	0,2
b062	6.077	0,00	1,00	32,1	42,4	0,1	31,9	77	0,0
b063	5.209	0,21	0,79	32,1	51,0	35,0	33,5	96	0,7
b064	11.509	0,00	1,00	32,1	40,0	0,1	34,3	79	1,0
b065	4.806	0,00	1,00	32,1	45,9	0,1	32,5	96	0,0
b066	4.208	0,00	1,00	32,1	39,9	0,1	32,9	75	0,0
b067	90.187	0,07	0,93	32,1	43,3	46,5	39,1	82	0,6
b068	40.115	0,18	0,82	32,1	47,1	39,2	39,5	93	0,6
b069	37.388	0,03	0,97	32,1	43,3	41,4	42,3	82	0,8
b070	51.802	0,07	0,93	32,1	43,2	46,8	47,3	79	0,4
b071	42.692	0,09	0,91	32,1	45,7	41,1	42,8	83	0,8
b072	40.741	0,03	0,97	32,1	45,6	51,8	44,2	84	0,8
b073	53.719	0,05	0,95	32,1	44,2	45,8	41,4	84	0,6
b074	41.555	0,14	0,86	32,1	45,7	45,0	49,5	87	0,8
b075	22.354	0,29	0,71	32,1	43,6	33,4	37,9	78	0,2
b076	26.190	0,27	0,73	32,1	46,6	34,6	33,9	88	0,5
b077	12.592	0,09	0,91	32,1	45,5	35,5	39,2	83	0,5
b078	50.666	0,18	0,82	32,1	40,1	35,4	36,0	74	0,2
b079	32.636	0,19	0,81	32,1	42,7	35,1	41,4	80	0,7
b080	22.831	0,32	0,68	32,1	45,1	35,1	40,9	81	0,8
b081	2.306	0,00	1,00	32,1	48,9	0,1	29,4	87	0,6
b082	39.014	0,05	0,95	32,1	42,7	39,9	37,6	80	0,7
b083	4.010	0,28	0,72	32,1	50,1	24,7	16,5	99	0,0
b084	5.701	0,73	0,27	32,1	50,3	25,2	22,5	94	0,0
b085	14.839	0,18	0,82	32,1	45,6	23,3	17,3	81	0,0
b086	14.566	0,56	0,44	32,1	44,8	26,1	20,6	80	0,0
b087	17.711	0,67	0,33	32,1	44,3	24,3	20,9	86	0,1
b088	6.180	1,00	0,00	32,1	0,1	30,0	0,1	65	0,1
b089	7.493	0,35	0,65	32,1	41,6	22,8	15,8	83	0,0
b090	4.857	0,63	0,37	32,1	45,9	43,6	19,3	76	0,2

	Produção (t)	fração		Col. (t/h)		Transp. (t/h)		Produtividade (t/ha)	Fração Irrig.
		man	mec	man	mec	man	mec		
b091	22.673	0,62	0,38	32,1	38,1	21,6	18,5	75	0,0
b092	8.881	0,62	0,38	32,1	69,2	16,5	19,1	86	0,0
b093	18.515	0,54	0,46	32,1	51,6	20,7	18,8	80	0,1
b094	13.032	0,46	0,54	32,1	40,9	33,0	23,3	71	0,1
b095	9.627	0,38	0,62	32,1	45,5	27,7	43,4	88	0,3
b096	10.807	0,68	0,32	32,1	42,0	18,0	19,9	77	0,0
b097	8.415	0,62	0,38	32,1	48,3	15,7	13,4	87	0,0
b098	7.610	1,00	0,00	32,1	0,1	16,7	0,1	65	0,0
b099	4.810	0,53	0,47	32,1	52,4	15,5	12,6	66	0,0
b100	14.583	1,00	0,00	32,1	0,1	15,8	0,1	62	0,0
b101	5.169	1,00	0,00	32,1	0,1	13,8	0,1	56	0,0
b102	3.414	1,00	0,00	32,1	0,1	13,7	0,1	88	0,0
b103	8.163	0,00	1,00	32,1	32,5	0,1	10,8	60	0,0
b104	9.343	0,00	1,00	32,1	75,2	0,1	9,9	140	0,0
b105	1.123	1,00	0,00	32,1	0,1	28,8	0,1	59	0,0
b106	7.896	1,00	0,00	32,1	0,1	30,2	0,1	63	0,3
b107	3.383	1,00	0,00	32,1	0,1	29,6	0,1	72	0,0
b108	2.573	1,00	0,00	32,1	0,1	20,7	0,1	63	0,1
b109	6.204	0,15	0,85	32,1	49,2	27,7	27,6	97	0,0
b110	25.531	0,08	0,92	32,1	52,2	26,9	29,2	96	0,7
b111	23.076	0,07	0,93	32,1	43,5	30,8	29,6	82	0,7
b112	28.430	0,01	0,99	32,1	48,7	24,1	31,2	87	0,8
b113	18.558	0,17	0,83	32,1	44,7	27,6	35,6	86	0,2
b114	13.125	0,16	0,84	32,1	47,0	23,2	33,1	85	0,2
b115	29.844	0,26	0,74	32,1	42,6	28,1	31,3	81	0,7
b116	10.193	0,03	0,97	32,1	47,1	26,9	29,7	90	0,4
b117	22.504	0,11	0,89	32,1	44,2	34,9	31,1	83	0,7
b118	6.877	0,53	0,47	32,1	54,4	22,2	26,3	82	0,2
b119	12.907	0,31	0,69	32,1	48,5	26,1	24,0	87	0,3
b120	13.461	0,39	0,61	32,1	40,1	30,6	28,6	72	0,1
b121	28.433	0,26	0,74	32,1	40,5	28,6	30,7	72	0,2
b122	6.204	1,00	0,00	32,1	0,1	30,1	0,1	76	0,6
b123	12.816	0,85	0,15	32,1	49,6	27,4	28,5	91	0,4
b124	1.279	1,00	0,00	32,1	0,1	26,9	0,1	97	1,0
b125	2.018	1,00	0,00	32,1	0,1	22,4	0,1	84	0,2
b126	6.742	0,00	1,00	32,1	38,8	0,1	22,9	77	0,6
b127	9.748	0,63	0,37	32,1	62,9	21,1	20,4	86	0,0
b128	8.183	0,00	1,00	32,1	54,1	0,1	22,0	106	1,0
b129	4.187	1,00	0,00	32,1	0,1	21,7	0,1	101	0,4
b130	1.537	1,00	0,00	32,1	0,1	18,7	0,1	100	0,3
b131	1.526	1,00	0,00	32,1	0,1	24,3	0,1	106	0,9
b132	36.957	0,32	0,68	32,1	46,4	30,4	18,0	83	0,1
b133	16.921	0,60	0,40	32,1	45,7	14,9	14,2	89	0,0
b134	16.009	0,93	0,07	32,1	45,2	13,7	14,3	65	0,0
b135	26.558	0,30	0,70	32,1	46,2	21,0	14,8	81	0,0

	Produção (t)	fração		Col. (t/h)		Transp. (t/h)		Produtividade (t/ha)	Fração Irrig.
		man	mec	man	mec	man	mec		
b136	24.583	0,33	0,67	32,1	48,2	20,0	17,2	84	0,0
b137	30.573	0,37	0,63	32,1	40,2	21,2	26,5	76	0,1
b138	3.665	0,58	0,42	32,1	40,5	30,9	15,0	88	0,2
b139	53.295	0,14	0,86	32,1	48,0	18,3	15,7	92	0,0
b140	5.090	0,15	0,85	32,1	50,4	12,6	18,5	91	0,0
b141	11.496	0,21	0,79	32,1	35,8	12,5	13,7	64	0,0
b142	10.819	0,31	0,69	32,1	36,6	12,6	12,6	76	0,0
b143	14.977	0,44	0,56	32,1	41,3	14,1	12,9	88	0,0
b144	9.323	0,00	1,00	32,1	51,0	0,1	13,4	91	0,0
b145	34.144	0,50	0,50	32,1	42,6	12,9	13,0	87	0,0
b146	5.785	0,59	0,41	32,1	41,0	12,1	12,1	92	0,0
b147	10.908	0,09	0,91	32,1	44,6	12,1	12,1	92	0,0
b148	1.012	0,00	1,00	32,1	43,3	0,1	12,1	90	0,0
b149	11.624	0,14	0,86	32,1	41,3	12,3	12,3	78	0,0
b150	3.309	0,00	1,00	32,1	42,9	0,1	12,3	81	0,0
b151	1.181	1,00	0,00	32,1	0,1	23,5	0,1	54	0,0
b152	299	1,00	0,00	32,1	0,1	30,4	0,1	44	0,0
b153	1.300	1,00	0,00	32,1	0,1	14,1	0,1	68	0,0
b154	1.447	0,00	1,00	32,1	46,7	0,1	12,3	82	0,0
b155	12.660	0,00	1,00	32,1	40,9	0,1	12,3	79	0,0
b156	450	1,00	0,00	32,1	0,1	26,1	0,1	50	0,0
b157	72.306	0,00	1,00	32,1	55,6	0,1	48,0	101	0,7
b158	35.307	0,12	0,88	32,1	50,7	37,1	39,9	96	0,5
b159	10.900	0,59	0,41	32,1	67,9	22,4	26,5	124	0,1
b160	41.041	0,16	0,84	32,1	59,6	26,5	29,7	111	0,1
b161	32.913	0,08	0,92	32,1	60,8	29,4	28,0	108	0,1
b162	43.424	0,25	0,75	32,1	50,9	15,2	14,6	100	0,0
b163	11.520	0,20	0,80	32,1	58,2	13,9	13,8	119	0,0
b164	52.756	0,08	0,92	32,1	59,5	30,4	40,3	117	0,0
b165	9.922	0,46	0,54	32,1	55,1	25,2	22,4	112	0,5
b166	9.322	0,00	1,00	32,1	66,2	0,1	34,3	116	0,0
b167	29.856	0,64	0,36	32,1	51,4	13,5	12,6	105	0,0
b168	45.846	0,79	0,21	32,1	70,2	14,5	12,8	117	0,0
b169	19.884	0,06	0,94	32,1	65,7	19,1	22,5	119	0,3
b170	27.113	0,29	0,71	32,1	58,9	18,1	20,1	113	0,3
b171	44.711	0,65	0,35	32,1	62,1	15,1	16,1	115	0,0
b172	30.435	0,64	0,36	32,1	55,6	13,5	13,5	105	0,0
b173	14.791	0,14	0,86	32,1	57,0	24,7	23,9	103	0,3
b174	38.299	0,00	1,00	32,1	52,7	0,1	12,3	109	0,0
b175	7.850	0,20	0,80	32,1	65,5	16,7	29,3	115	0,0
b176	12.524	0,00	1,00	32,1	63,9	0,1	29,2	121	0,0
b177	7.317	0,00	1,00	32,1	52,8	0,1	13,3	119	0,0
b178	4.233	0,57	0,43	32,1	55,9	22,9	22,6	128	0,0
b179	3.505	0,00	1,00	32,1	54,4	0,1	22,3	129	0,0
b180	2.763	1,00	0,00	32,1	0,1	30,4	0,1	129	0,0
b181	16.569	0,00	1,00	32,1	69,2	0,1	21,7	124	0,0
b182	2.221	0,00	1,00	32,1	62,5	0,1	10,8	119	0,0
b183	6.260	1,00	0,00	32,1	0,1	12,8	0,1	109	0,0

Apêndice D: Questionário para especialistas em planejamento

Pesquisa com especialistas em planejamento de colheita

Este questionário faz parte de uma tese de doutorado que propõe um modelo para a programação das frentes de colheita considerando as capacidades de colheita e transporte, bem como o deslocamento das frentes de colheita. As respostas do questionário têm o propósito de validar, com especialistas envolvidos em planejamento, a importância das premissas deste modelo.

Para os convidados que tiverem condições de responder o questionário, será dado um *feedback* desta pesquisa.

* Required

1 - Qual a relevância do planejamento de colheita para o negócio de uma usina de cana-de-açúcar? *

1 2 3 4 5

Pouco relevante

Muito relevante

Comente sua resposta da pergunta 1:*

2 - Qual a importância de considerar as capacidades de colheita e transporte antes de uma área ser plantada? *

Dependendo do tipo de variedade escolhida para plantar (precoce, média e tardia), pode resultar no decorrer da safra em momentos com raio médio muito próximo e muito distante, por exemplo. A questão está relacionada a saber qual a importância que você atribui a equilibrar as capacidades de colheita e transporte antes da área ser plantada.

1 2 3 4 5

Pouco importante

Muito importante

Comente sua resposta da pergunta 2:*

3 - Como o planejamento de colheita é tratado em usinas de cana-de-açúcar? *

Tratamento empírico está relacionado em utilizar apenas a experiência do planejador. Já o tratamento técnico está relacionado à utilização de *softwares* de apoio à tomada de decisão para a realização do planejamento de colheita. Pode se pensar em um misto dos dois quando há uma ferramenta para a tomada de decisão, mas o planejador influencia os dados de entrada ou saída com base em sua experiência (equivalente ao número 3).

1 2 3 4 5

Empírico Técnico

Comente sua resposta da pergunta 3: *

4 - O quanto é importante considerar outras variáveis além da distância entre a usina e o bloco de colheita, como, por exemplo, a velocidade das vias? *

1 2 3 4 5

Pouco importante Muito importante

Comente sua resposta da pergunta 4: *

5 - O quanto é importante considerar a capacidade de colheita mecanizada, considerando a produtividade da área (t/ha), a velocidade da colhedora, o tempo de manobra da colhedora/transbordo e o tamanho do tiro de colheita? *

1 2 3 4 5

Pouco importante Muito importante

Comente sua resposta da pergunta 5: *

6 - Qual é o nível de dificuldade na obtenção dos dados mencionados (velocidade das vias, produtividade da área, velocidade da colhedora, tempo de manobra da colhedora/transbordo e tamanho do tiro de colheita)? *

1 2 3 4 5

Fácil

Muito difícil

Comente sua resposta da pergunta 6: *

7 - O quanto é relevante tratar o tempo perdido das colhedoras com o deslocamento das frentes de colheita? *

1 2 3 4 5

Pouco relevante

Muito relevante

Comente sua resposta da pergunta 7: *

8 - Como os *softwares* disponíveis no mercado para planejamento de colheita tratam as capacidades de colheita e transporte, bem como o deslocamento das frentes? *

1 2 3 4 5

De maneira pouco satisfatória

De maneira muito satisfatória

Comente sua resposta da pergunta 8: *

9 - Qual dos critérios abaixo é o melhor objetivo para a obtenção de boa qualidade da matéria-prima no planejamento de colheita de safra? *

O pol seria estimado através de curvas de maturação da variedade gerais ou medidas na usina com aceitação estatística. O PUI (Período de Utilização Industrial) envolve o período em que a variedade plantada na área pode ser colhida com base nas características edafo-climáticas que permitam a obtenção de maior produtividade e riqueza de açúcares.

Maximização do pol

Cumprimento do PUI praticado na usina para a variedade e seu tipo de manejo (sequeiro e irrigado, por exemplo)

Outro

Comente sua resposta da pergunta 9 *

Apêndice E: Resposta do questionário

Nome do entrevistado:	A	B	C	D
1 - Qual a relevância do planejamento de colheita para o negócio de uma usina de cana-de-açúcar?	(5) O Planejamento/programação de colheita, entendo que seja o “coração” de uma usina de bioenergia. Hoje, os custos de produção, não somente para esse segmento, mas para outros também, estão cada vez maiores, dessa forma, temos que aproveitar o máximo que a matéria-prima pode nos oferecer e isso se dá no momento da colheita da cana-de-açúcar.	(5) Pois é o momento crítico de toda usina. Onde estão alocados grande parte dos recursos e pessoal. E planejando a colheita podemos antever gargalos e oportunidades de ganho, reduzindo custos e melhorando o resultado operacional.	(5) O planejamento de colheita é ponto inicial para que se possa estimar a quantidade de recursos necessários para atender a demanda de moagem na safra e, conseqüentemente, minimizar os possíveis gargalos. Ele também possibilita a estimativa de receita em termos de ATR a serem produzidos no tempo e, assim, junto com o orçamento, dá uma estimativa razoável do fluxo de caixa.	(5) O planejamento agrícola, além de buscar seu usual objetivo de maximizar o aproveitamento do TPH durante a safra, visa prever eventuais dificuldades para as operações agrícolas, como estradas, acessos, rendimento de equipamentos, de forma a atender as metas projetadas viabilizando a redução de custo. Pois, empresa boa é aquela ganha mais que gasta e não a que mais fatura. Ou seja, a redução de custo é principal objetivo da área agrícola, a qual detém a maior parte dos custos do negócio.
2 - Qual a importância de considerar as capacidades de colheita e transporte antes de uma área ser plantada?	(4) Entendo que esse procedimento também é de extrema importância, porém temos que analisar também os ambientes de produção das unidades, pois é algo que não temos ação. Dessa forma, a alocação das variedades (precoce, média e tardia) talvez não atenda às necessidades quanto ao raio médio. É lógico que hoje também já temos ferramentas no mercado que já fazem essa análise (longo prazo) antes de sugerir a melhor variedade x ambiente de produção a ser plantada, visando o planejamento de colheita a longo prazo.	(5) Devemos antever a capacidade produtiva dos blocos de colheita para que os recursos sejam aproveitados em sua totalidade. Não ocorrendo, assim, períodos com sobra ou déficit de recursos.	(4) A equalização dos recursos de transporte e colheita é importante, porém se os ambientes de produção não permitirem tal equalização, o encarregado do planejamento de plantio deverá adequar as variedades disponíveis com os ambientes de produção e depois, como segundo objetivo, minimizar a quantidade de recursos de transporte.	(3) Importe é. Porém, a atual situação de organização das usinas não atende nem o “arroz com feijão”, o que já é sabido. Conceitos básicos são mascarados e manipulados por planejamentos tabulares não práticos. Portanto, raríssimas usinas tem o “luxo” dessa análise pré-plantio.

Nome do entrevistado:	A	B	C	D
<p>3 - Como o planejamento de colheita é tratado em usinas de cana-de-açúcar?</p>	<p>(4) Hoje eu diria que 70% das unidades produtoras adotam alguma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão. As variáveis a serem observadas são muitas antes de tomar uma decisão e vejo que sem uma ferramenta isso se torna muito difícil. A ferramenta sempre vai buscar maximizar os ganhos (através de matrizes com milhões de combinações possíveis), porém como nem todo o planejamento de plantio é feito buscando esse ganho, muitas vezes o técnico com base na experiência tem que intervir na sugestão da ferramenta. O misto dos dois (ferramenta e técnico) sempre são acatados e no final a gerência tem que opinar.</p>	<p>(3) Nas usinas que utilizam os <i>softwares</i> existentes, muito ainda está na mão do planejador/equipe técnica. Ou seja, falta desenvolver mais a ferramenta e o usuário. Mas ainda existem usinas que ainda não utilizam nenhuma ferramenta para nortear a tomada de decisão.</p>	<p>(4) O planejador tem muito a contribuir nos resultados de qualquer ferramental e, sempre, deve avaliar e modificar os cenários – quando necessário.</p>	<p>(2) Ainda estamos longe de ter um <i>software</i> que nos atenda à tomada de decisão puramente técnica. Hoje os <i>softwares</i> são de grande valia para ajudar na organização, interpretação e manipulação dos dados, mas longe de propor uma sequência lógica efetiva de caminhamento de frente, na qual a noção espacial e infraestrutura viária ainda não estão presentes. A vivência do planejador ainda é a fonte de maior sucesso, mesmo por que a força política envolvida no planejamento ainda é muito forte, principalmente nas indústrias que detêm maior volume de canas de fornecedores autônomos.</p>

Nome do entrevistado:	A	B	C	D
<p>4 - O quanto é importante considerar outras variáveis além da distância entre a usina e o bloco de colheita, como, por exemplo, a velocidade das vias?</p>	<p>(3) É lógico que se pensarmos em custo, as vias de acesso são muito importantes (pois consigo trabalhar com uma estrutura menor de CCT), porém com estrutura suficiente para não faltar matéria-prima na usina, nosso foco no planejamento de colheita será sempre maximizar o TPH (Pol + Produtividade)</p>	<p>(5) Muitas usinas não "cuidam de suas estradas", e depois não sabem a causa da falta de matéria-prima na indústria e baixa produtividade das frentes. Levam em consideração apenas o raio médio e não a trafegabilidade. Compensando essa ineficiência alocando mais recursos de colheita/transporte, e conseqüentemente aumentado o custo da operação.</p>	<p>(5) O importante é o tempo do trajeto e não a distância.</p>	<p>(5) As distâncias entre os blocos e a usina são comumente usadas pela sua estabilidade, ou seja, poucas são as áreas que mudam os trajetos de um ano para outro. Por isso, a distância é muito importante para o pagamento objetivo de prestadores de serviço. Entretanto, eu já não faço uso desse modelo, uma vez que o fluxo de matéria-prima depende do tempo gasto e não da quilometragem. A relação dessas variáveis não é direta e nem intuitiva. O uso do tempo de trajeto tem uma maior instabilidade, principalmente quando a maior parte dos trajetos é por estradas não pavimentadas, entretanto lhe traz uma confiabilidade muito maior no curto prazo.</p>

Nome do entrevistado:	A	B	C	D
<p>5 - O quanto é importante considerar a capacidade de colheita mecanizada, considerando a produtividade da área (t/ha), a velocidade da colhedora, o tempo de manobra da colhedora/transbordo e o tamanho do tiro de colheita?</p>	<p>(5) Hoje para fazermos um planejamento de colheita ideal, novamente temos que pensar primeiramente em custo de CCT, porém não podemos deixar em hipótese alguma faltar matéria-prima na indústria. Para um planejamento ideal, temos que pensar sempre no “pico” de moagem da indústria e a partir desse ponto definir a estrutura para atender. Se trabalharmos pensando no aproveitamento de tempo geral da indústria, corremos um risco muito grande onde nos dias de moagem acima da média pode ocorrer falta de matéria-prima. Buscando sempre uma melhoria no processo, as usinas tem investido muito em computadores de bordo, buscando sempre a otimização de sua estrutura de CCT</p>	<p>(5) Todos esses fatores devem ser analisados durante o dimensionamento dos recursos de colheita a fim de maximizar a produção da frente.</p>	<p>(5) São as variáveis que determinam a colheitabilidade da área.</p>	<p>(4) A influência dessas variáveis está inversamente ligada ao número de frentes de colheita. Quanto maior for a escala, menor é a influência, pois se aproxima mais da média. Já em pequenas unidades, é muito importante. Porém, esta avaliação ainda é feita muito no <i>feeling</i> da operação. Ainda não vi uma unidade trabalhar de forma objetiva e efetiva.</p>
<p>6 - Qual é o nível de dificuldade na obtenção dos dados mencionados (velocidade das vias, produtividade da área, velocidade da colhedora, tempo de manobra da colhedora/transbordo e tamanho do tiro de colheita)?</p>	<p>(1) Como dito no final da questão anterior, os investimentos em bordos tem auxiliado muito na obtenção dessas informações. Hoje você consegue analisar em tempo real a velocidade de um rodotrem em uma determinada via, consegue facilmente gerar gráficos e relatórios com todos os tempos ociosos das colhedoras e dos transbordos. Com base nessas informações é possível encaminhar para os operadores para que tenham consciência dos indicadores que precisam ser melhorados inclusive conseguimos “amarrar” esses indicadores à Participação nos Lucros e Resultados da empresa.</p>	<p>(3) Isso irá depender do nível tecnológico que usina dispõe e do nível de utilização dessas ferramentas. Pois hoje dispomos de ferramentas que nos fornecem todos esses dados de maneira fluida e precisa, como por exemplo, computadores de bordo, mapeamento das vias, imagens via satélite.</p>	<p>(2) Acredito que com uma equipe bem treinada e motivada não existe problema para se calcular os potenciais de cada bloco / área.</p>	<p>(3) Para o planejamento, você depende muito da experiência da operação, já que é tudo visual e por estimativas. Uma vez que se inicia a operação no local, não há grandes dificuldades em obter esses dados.</p>

Nome do entrevistado:	A	B	C	D
<p>7 - O quanto é relevante tratar o tempo perdido das colhedoras com o deslocamento das frentes de colheita?</p>	<p>(4) Dificilmente você consegue trabalhar com poucas frentes de colheita, justamente pelo tempo que você “perde” com as mudanças. Isso também varia de região para região. Nos estados do MS, GO e MT, por exemplo, esse tempo acaba sendo menor, pois as grandes fazendas acabam proporcionando uma colheita quase que constante na mesma área, já em SP, por exemplo, você tem fazendas menores o que acaba por ocasionar mudanças com maior frequência. Para reduzir isso, durante o planejamento de colheita temos que levar em consideração também a alocação de blocos próximos sempre para uma mesma frente e assim por diante para as outras. Dessa forma, reforço a importância de utilizarmos ferramentas que auxiliem na tomada de decisão, pois conseguem fazer isso com muita facilidade.</p>	<p>(4) Importante, já que mudança de frente descoordenada causa desabastecimento de matéria-prima para indústria, principalmente quando as frentes estão com a capacidade produtiva desbalanceada.</p>	<p>(5) Porque nesses momentos existem perdas de produção – toneladas por hora. Assim blocos de colheita bem dimensionados fazem com que a perda por mudanças sejam mínimas.</p>	<p>(3) Esse quesito está mais relacionado à eficiência do planejamento operacional, pois deixando os locais de maior rendimento para a mudança e iniciando a nova área pelos locais de melhor rendimento, não há grandes perdas de produção. Porém, esta ação deve ser considerada na disponibilidade operacional do equipamento.</p>
<p>8 - Como os softwares disponíveis no mercado para planejamento de colheita tratam as capacidades de colheita e transporte, bem como o deslocamento das frentes?</p>	<p>(4) Lembramos novamente que nosso foco no planejamento será sempre maximizar o TPH, porém não podemos em hipótese alguma nos esquecer da logística. A maioria desses <i>softwares</i> trabalha com restrições, ou seja, nós é que somos responsáveis pelos resultados; sendo assim, se priorizarmos a logística, podemos estar comprometendo o TPH, porém se priorizarmos as idades, podemos comprometer o raio médio. Enfim, para cada cenário solicitado temos que analisar todos esses fatores.</p>	<p>(1) Ainda não conheço um <i>software</i> para colheita que trate essas variáveis logísticas.</p>	<p>(2) Pelo pouco conhecimento que tenho, não tenho utilizado nenhum deles, notei que necessitam de um aprimoramento muito profundo nessas duas vertentes. A maioria dos clientes veem os resultados de transporte e colheita nesses <i>softwares</i>, mas preferem usar seus simuladores em planilhas.</p>	<p>(2) Para as variáveis de capacidade produtiva e transporte, já estão bem evoluídos, desde que bem utilizados, já as propostas de deslocamento de frentes, são muito ineficientes. Mesmos as propostas de correlação de coordenados é muito falho, aguardo o processo de roteirização de SIG, que estamos estudando.</p>

Nome do entrevistado:	A	B	C	D
<i>9 - Qual dos critérios abaixo é o melhor objetivo para a obtenção de boa qualidade da matéria-prima no planejamento de colheita de safra?</i>	Maximização do pol	Maximização do pol	Outro	Cumprimento do PUI praticado na usina para a variedade e seu tipo de manejo (sequeiro e irrigado, por exemplo).