

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Ricardo Pereira
Pupulin..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 23.10.10.....

Marcos Fábio Henrique Paulh
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Ricardo Pereira Pupulin

Sistema de apoio para programação de colheita em usina de cana-de-açúcar

Campinas, 2010

82/2010

Ricardo Pereira Pupulin

Sistema de apoio para programação de colheita em usina de cana-de-açúcar

Tese apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho

Campinas

2010

i

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

P969s	<p>Pupulin, Ricardo Pereira</p> <p>Sistema de apoio para programação de colheita em usina de cana-de-açúcar / Ricardo Pereira Pupulin. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.</p> <p>Orientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Programação linear. 2. Otimização. 3. Cana-de-açúcar. I. Carvalho, Marcius Fabius Henriques de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Support system for harvest scheduling of sugar cane mill

Palavras-chave em Inglês: Linear programming, Optimization, Sugar cane

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Oswaldo Luiz Agostinho, Orlando Fontes Lima Júnior

Data da defesa: 23/06/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

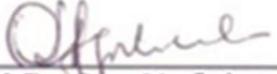
**SISTEMA DE APOIO PARA PROGRAMAÇÃO DE
COLHEITA EM USINA DE CANA DE AÇÚCAR**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e processos de fabricação

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho, Presidente
Instituição: FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho
Instituição: FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Junior
Instituição: FEC/UNICAMP

Campinas, 23 de junho de 2010

Eu dedico este trabalho aos meus pais pelo exemplo de vida que me passam a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ter sido feito sem a ajuda de algumas pessoas que serão homenageadas abaixo:

Agradeço a Deus pela vida e pelas pessoas que colocaram em meu caminho.

Aos meus pais e irmão pelo constante incentivo e cobrança.

À minha namorada pelo total apoio.

À todos os professores do Departamento de Fabricação.

À secretária Vera e ao pessoal da secretaria de pós-graduação que sempre ajudam da melhor forma quando solicitados.

Ao Engenheiro Agrônomo Paulo Aguiar que me forneceu todas as informações necessárias e esclareceu todas as dúvidas no decorrer do estudo.

Ao meu amigo e orientador Marcius pela confiança depositada para execução do trabalho e total colaboração no estudo.

“O único homem que não erra é aquele que nunca faz nada.”

Franklin Delano Roosevelt

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo encontrar a melhor programação de colheita para a usina de cana-de-açúcar em estudo. Foram desenvolvidos modelos com base em programação linear que representem o melhor mix varietal do canavial, a melhor programação de colheita com as variedades existentes e o pior cenário, este desenvolvido para quantificar a produção real percebida no período. Estes modelos foram feitos com os rendimentos das variedades divididos em dois grupos que seriam os modelos com base de dados no histórico de colheita e os modelos com base na safra de 08/09.

Palavras chave: Programação linear, cana-de-açúcar, otimização

ABSTRACT

The main purpose of this project is to find the best harvest scheduling program to sugar cane. Models were developed with a linear programming that represent the best variety mix for the reed, the best harvest program with the current sugar cane varieties and the worst scenario, this was done to qualify the real production perceived at the period. These models were done with the varieties income shared in two groups that would be the models based on the harvest historic and the models based on the 08/09 crop.

Keywords: Linear programming, sugar cane, optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da produção brasileira de açúcar e etanol (fonte: LMC Intenational, 2008).....	12
Figura 2: Principais produtores mundiais de açúcar (fonte: LMC International, 2008).	13
Figura 3: Balanço de Oferta e Demanda do Açúcar Mundial (fonte: LMC International, 2008).....	14
Figura 4: Principais países produtores de etanol (fonte: LMC International, 2008)	15
Figura 5: Balanço de oferta e demanda de Etanol (fonte: LMC International, 2008)....	15
Figura 6: Composto da cana-de-açúcar (fonte: Caderno copersucar, 1988)	28
Figura 7: Obtenção de ATR (fonte: Caderno Copersucar, 1988).....	29
Figura 8: Formação do índice de ATR (fonte: Caderno Copersucar, 1988)	30
Figura 9: Rendimento Histórico e da última safra do grupo Precoce 1.....	33
Figura 10: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 2	34
Figura 11: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 3	35
Figura 12: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 1	36
Figura 13: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 2.....	37
Figura 14: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 3	38
Figura 15: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 1	39
Figura 16: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 2.....	40

Figura 17: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 3.....	41
Figura 18: Balanço Hídrico da região de colheita da usina (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC)	45
Figura 19: Comparativo Previsto x Realizado por índice de ATR (fonte: Dados fornecidos pela usina).....	46
Figura 20: Balanço Hídrico da área de colheita da usina em 2007 (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC).....	46
Figura 21: Balanço Hídrico da área de colheita da usina em 2008 (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC).....	47
Figura 22: Balanço Hídrico da área de colheita da usina em 2009 (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC).....	47
Figura 23: Gráfico de rendimento do ATR histórico mensal dos grupos de variedade .	54
Figura 24: Rendimento mensal em ATR das variedades na safra 08/09.....	65
Figura 25: Diferença entre ATR real e ATR otimizado no modelo de apresentação.....	79
Figura 26: Resultado mensal ATR médio Modelo 01	84
Figura 27: Resultado mensal ATR médio modelo 02	88
Figura 28: Resultado ATR médio mensal modelo 03	92
Figura 29: Resultado ATR médio mensal modelo 01	97
Figura 30: Resultado ATR médio mensal modelo 02	101
Figura 31: Resultado dos modelos com base de dados histórica e real ocorrido	108
Figura 32: Desempenho do real ocorrido pelo máximo obtido nos modelos 02 e 03..	109
Figura 33: Organização da colheita do modelo 01 com base de dados histórica	110

Figura 34: Organização da colheita do modelo 02 com base de dados histórica	110
Figura 35: Organização da colheita do modelo 03 com base de dados histórica	111
Figura 36: Resultado dos modelos com base de dados da safra 08/09 e real ocorrido.	111
Figura 37: Desempenho do real ocorrido pelo máximo obtido nos modelos 02 e 03 ..	112
Figura 38: Organização da colheita do modelo 01 com base de dados da safra 08/09	113
Figura 39: Organização da colheita do modelo 02 com base de dados da safra 08/09	113
Figura 40: Organização da colheita do modelo 03 com base de dados da safra 08/09	114
Figura 41: Comparativo Rendimento ATR médio dos modelos com base de dados histórica x real x variedades	115
Figura 42: Comparativo Rendimento ATR médio dos modelos com base de dados da safra 08/09 x real x variedades	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da cana-de-açúcar (fonte: Caderno Copersucar, 1988)..	7
Tabela 2: Constituintes da cana-de-açúcar (fonte: Caderno Copersucar, 1988)	8
Tabela 3: Demanda do etanol brasileiro (fonte: MILANEZ et al, 2008)	18
Tabela 4: Rendimento Histórico e da última safra do grupo Precoce 1	33
Tabela 5: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 2	34
Tabela 6: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 3	35
Tabela 7: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 1	36
Tabela 8: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 2	36
Tabela 9: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 3	37
Tabela 10: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 1	38
Tabela 11: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 2	39
Tabela 12: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 3	40
Tabela 13: Aproveitamento de tempo da Usina Iracema safra 08/09	42
Tabela 14: Capacidade disponível mensal da usina	42
Tabela 15: Produtividade de cana por Hectare	48
Tabela 16: Produtividade de Pol por Hectare	48
Tabela 17: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade RB867515 ...	50
Tabela 18: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade RB855453 ...	50
Tabela 19: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade SP80-1816 ...	51

Tabela 20: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade SP80-3280 ...	51
Tabela 21: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade SP83-2847 ...	51
Tabela 22: Resultado da somatória mensal de quantidade de cana colhida e ATR médio	51
Tabela 23: Rendimento histórico de ATR mensal dos grupos de variedades	53
Tabela 24: Quantidade de cana mensal disponível em cada bloco de colheita	54
Tabela 25: Rendimento mensal em ATR das variedades na safra 08/09.	64
Tabela 26: Quantidade de cana mensal disponível para ser colhida	65
Tabela 27: Resultado real da safra 08/09.....	76
Tabela 28: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade RB867515.....	77
Tabela 29: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade RB855453.....	77
Tabela 30: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade SP80-1816	77
Tabela 31: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade SP80-3280	77
Tabela 32: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade SP83-2847	77
Tabela 33: Resultado final por toneladas e ATR médio.....	78
Tabela 34: Diferença de produtividade da variedade RB867515 no modelo de apresentação	78
Tabela 35: Diferença de produtividade da variedade RB855453 no modelo de apresentação	78
Tabela 36: Diferença de produtividade da variedade SP80-1816 no modelo de apresentação	78
Tabela 37: Diferença de produtividade da variedade SP80-3280 no modelo de apresentação	78

Tabela 38: Diferença de produtividade da variedade SP83-2847 no modelo de apresentação	79
Tabela 39: Rendimentos com base em histórico de colheita.....	80
Tabela 40: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 01	81
Tabela 41: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 01	81
Tabela 42: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 01 ..	82
Tabela 43: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 01	82
Tabela 44: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 01.	83
Tabela 45: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 01	83
Tabela 46: Resultado ATR médio Modelo 01	84
Tabela 47: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 02	85
Tabela 48: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 02	85
Tabela 49: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 02 ..	86
Tabela 50: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 02	86
Tabela 51: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 02.	87
Tabela 52: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 02	87
Tabela 53: Resultado ATR médio modelo 02	88
Tabela 54: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 03	89
Tabela 55: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 03	89
Tabela 56: Quantidade mensal colhida por variedade no Bloco Limeira – modelo 03..	90
Tabela 57: Quantidade mensal colhida por variedade no Bloco Rodotrem – modelo 03	90

Tabela 58: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 03.	91
Tabela 59: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 03	91
Tabela 60: Resultado ATR médio modelo 03	92
Tabela 61: Índices ATR reais da safra 08/09	93
Tabela 62: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 01	93
Tabela 63: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 01	94
Tabela 64: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 01 ..	94
Tabela 65: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem- modelo 01	95
Tabela 66: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 01.	95
Tabela 67: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 01	96
Tabela 68: Resultado ATR médio modelo 01	96
Tabela 69: Quantidade colhida mensal por variedade no bloco Aspersão – modelo 02	98
Tabela 70: Quantidade colhida mensal por variedade no bloco Boa Vista – modelo 02	98
Tabela 71: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 02 ..	99
Tabela 72: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 02	99
Tabela 73: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 02	100
Tabela 74: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 02	100
Tabela 75: Resultado ATR médio modelo 02	101
Tabela 76: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 03	102
Tabela 77: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 03	102

Tabela 78: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 03	103
Tabela 79: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 03	103
Tabela 80: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 03	104
Tabela 81: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 03	104
Tabela 82: Resultado ATR médio modelo 03	105
Tabela 83: Resultado ATR médio mensal modelo 03	105
Tabela 84: Cálculo de conversão de toneladas de cana em valores monetários.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PIB – Produto Interno Bruto

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UNICA – União da Indústria da cana-de-açúcar

ATR – Açúcar Total Reduzido

IAA – Instituto do Açúcar e do Alcool

ANP – Agência Nacional do Petróleo

ART – Açúcares Redutores Totais

Pol – Índice de sacarose da cana

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Caracterização do ambiente da proposta.....	1
1.2. Formulação do problema	2
1.3. Objetivo Geral.....	2
1.4. Objetivos Específicos	3
1.5. Justificativa	3
1.6. Viabilidade e importância	5
1.7. Conteúdo do trabalho.....	6
2. Revisão da Literatura.....	7
2.1. Revisão do estudo da cana-de-açúcar	7
2.1.1. Breve histórico da agroindústria sucroalcooleira no Brasil.....	8
2.1.2. O Setor Sucroalcooleiro no Brasil	11
2.1.3. O açúcar e o etanol	13
2.1.4. Perspectivas para o futuro do etanol brasileiro.....	16
2.1.5. A cana-de-açúcar e o etanol como fonte de energia.....	19
2.1.6. Novas tecnologias e desenvolvimento do setor	19
2.2. Revisão do conceito de Programação Linear.....	20

2.2.1.	O processo da tomada de decisão	21
2.2.2.	Revisão do Conceito de Programação Linear	21
2.2.3.	O processo de modelagem.....	22
2.2.4.	Processo de Resolução de um Problema	23
2.2.5.	Fundamentos da programação linear	24
3.	Método de Pesquisa.....	27
3.1.	Apresentação do objeto de estudo.....	27
3.1.1.	Conceitos Básicos.....	27
3.2.	Função Objetivo.....	31
3.2.1.	Blocos de colheita.....	31
3.2.2.	Variedades	32
3.3.	Restrições.....	41
3.3.1.	Capacidade de tempo disponível na usina.....	41
3.3.2.	Área de vinhaça Aspersão	43
3.3.3.	Área de vinhaça Caminhão (Rodotrem)	43
3.3.4.	Área de águas residuárias (Boa Vista).....	43
3.3.5.	Área da Serra	44
3.3.6.	Área de Limeira	44
3.3.7.	Área de Sequeiro	44
3.4.	Delimitações do modelo	44

3.4.1.	Balanço Hídrico	45
3.4.2.	Valor de ATR das variedades nos blocos	47
3.4.3.	Logística dos blocos	48
3.5.	Descrição dos modelos	49
3.5.1.	Modelo de Apresentação	49
3.5.2.	Modelos com base em histórico de colheita	52
3.5.3.	Modelos com base de dados da última safra	64
4.	Resultados e Discussões	75
4.1.	Resultado da safra analisada 08/09 – Dados reais	76
4.2.	Resultado do modelo de apresentação	76
4.3.	Resultado dos modelos com base no histórico de colheita	80
4.3.1.	Resultados do Modelo 01	80
4.3.2.	Resultados do Modelo 02	84
4.3.3.	Resultados do Modelo 03	88
4.4.	Resultado dos modelos com base de dados da safra 08/09	92
4.4.1.	Resultados do Modelo 01	93
4.4.2.	Resultados do Modelo 02	97
4.4.3.	Resultados do Modelo 03	101
4.5.	Análises	105
4.5.1.	Análise do modelo de Apresentação	106

4.5.2.	Análise do modelo com base no histórico de colheita.....	107
4.5.3.	Análise do modelo com base do resultado da safra 08/09.....	111
4.5.4.	Análise dos rendimentos de ATR históricos e da última safra.....	114
5.	Conclusão e sugestões para trabalhos futuros	117
	Referências Bibliográficas.....	120

1. INTRODUÇÃO

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DA PROPOSTA

O petróleo é atualmente a principal fonte de energia no mundo, pois mais da metade de toda a energia produzida mundialmente provém de seus poços. Além de importante fonte de energia, é matéria-prima para vários produtos como lubrificantes, asfalto, plásticos, fibras sintéticas entre outros. O petróleo foi considerado insubstituível devido à versatilidade de sua composição para fabricação de tantos produtos.

A partir desta dependência do petróleo todos os países estão à busca de novas fontes alternativas que o substitua considerando que este é um produto não-renovável e disponível em poucos países. Dentro deste cenário surge o cultivo de cana-de-açúcar que produz açúcar, um importante item da cadeia alimentar; o etanol, substituto da gasolina que é um importante derivado do petróleo e energia elétrica através da queima de bagaço de cana.

O Brasil se destaca como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. No cenário econômico brasileiro o cultivo desta planta tem grande importância no PIB nacional.

O trabalho está neste contexto ao passo que propõe o desenvolvimento de modelos matemáticos aplicáveis a uma usina de açúcar e etanol. Os modelos buscam a escala ideal de produção para que se obtenha um rendimento maior utilizando a mesma quantidade de recursos.

Os modelos desenvolvidos consideram os diferentes tipos de solos e áreas, os tipos de variedade, restrições particulares dos blocos de colheita e quantidade de cana disponível no canavial. Foram desenvolvidos modelos de programação linear formatados para utilização do solver do Excel.

Através dos modelos criados pretende-se, por meio de geração de cenários, auxiliar o agricultor na determinação de uma escala de colheita ao longo do ano. Considerando que

as diversas variedades de cana têm comportamentos distintos durante o ano, procura-se obter o resultado de máximo rendimento para o canavial.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A usina Iracema está localizada na cidade de Iracemápolis e apresenta área total de 21.543,38 ha ou 8.617,35 alqueires paulista, ocupados com plantações de cana-de-açúcar.

A área total cultivada da usina, devido ao tamanho da área de colheita, possui relevo e características de solo distintas. Apresenta áreas com relevo pouco e médio ondulados onde é feito basicamente a colheita manual e áreas planas onde é feito o corte mecanizado. Quando a declividade do terreno é acima de 12%, é feito o corte manual. A usina apresenta corte mecanizado de 85% em relação a toda a área cultivada.

A Usina Iracema faz parte de um grupo chamado Grupo São Martinho que consiste em três unidades produtoras de açúcar e álcool que são: Usina São Martinho, em Pradópolis-SP; Usina Iracema, em Iracemápolis-SP; Usina Boa Vista, em Quirinópolis-GO e Omtex que produz RNA (Sal sódico do Ácido Ribonucléico) em Iracemápolis-SP. Com seus planos de investimentos, a São Martinho pretende alcançar volume de 30 milhões de toneladas de cana processadas em 2020. Nesta safra 2008/09, a estimativa é moer 11,2 milhões de toneladas. Com faturamento bruto de R\$ 787 milhões, o grupo é controlado por três holdings: a de João Guilherme, com 25,2%, a de Luiz Ometto, com 25,2% e a de Nelson Ometto, com 10,2%. O restante das ações está diluído entre acionistas minoritários e mercado.

1.3. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de apoio para tomada da melhor decisão quanto à programação de colheita visando a maximização total de ATR (Açúcar Total Reduzido), considerando o rendimento dos diferentes cultivares e as restrições operacionais de uma usina. Como os rendimentos são variáveis em função de natureza

climática e efadológica, o estudo procura contemplar todo o histórico de dados para que o resultado seja o mais próximo possível da realidade. Contudo, há um conjunto de variáveis não estruturáveis que obriga a interferência de um decisor.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos ao estudo estão listados abaixo:

- Coleta e tratamento adequado dos dados necessários ao melhor desempenho dos modelos como: Rendimento das diferentes variedades de cana, levantamento dos tipos de solo da área plantada, capacidade instalada da usina, blocos de colheita e suas restrições particulares. Seleção dos dados pertinentes e organização para tratamento posterior.
- Desenvolvimento de modelos de programação linear considerando as restrições do negócio (área da fazenda, capacidade da usina, área liberada para vinhaça, restrição de variedade).
- Desenvolvimento de três diferentes modelos com fins distintos. O primeiro busca a pior escala de produção desde que atenda à necessidade de cana na usina. O segundo contempla a melhor escala de produção obedecendo todas as restrições do negócio. O terceiro apresenta o melhor mix de variedades para o canavial, seria uma sugestão para plantio futuro.
- Geração de dois cenários considerando como rendimento das variedades o histórico de colheita e os valores de rendimento da última safra.

1.5. JUSTIFICATIVA

O tema mais desafiador do momento, sem dúvida, é o desenvolvimento sustentável associado a prover a cada dia mais conforto a humanidade por meios que diminuam o seu esforço físico, o número de horas em que se passa trabalhando e o menor uso de recursos não renováveis e renováveis.

Neste ponto depara-se com uma questão: Quanto mais se utiliza os recursos não renováveis mais se aproxima o fim destes recursos. E como gerenciar este desafio? Como permitir que a humanidade se desenvolva, utilizando-se de recursos não renováveis, por mais tempo? Sem dúvida a resposta passa pela substituição destes recursos por fontes alternativas renováveis.

Neste contexto como uma solução aparece a cana de açúcar, uma planta da família das gramíneas (*Saccharum officinarum L.*) cultivada nas regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, ela é a base para a produção de açúcar, etanol, energia elétrica através da queima de palha e do bagaço da cana e outros subprodutos; portanto, fornece produtos para a base alimentar e também é uma fonte alternativa de energia renovável.

Embora conhecida e utilizada desde o início da colonização brasileira, ganha destaque agora como fonte alternativa do petróleo para suprimento dos veículos automotores por dois motivos: substituta de um recurso não renovável e polui menos o meio ambiente.

Entretanto, entra em discussão a poluição que toda a cadeia produtiva que vai do plantio ao produto final traz, a contaminação e degradação da área plantada, ocupação de espaços que outras culturas destinadas à alimentação teriam e interesses econômicos entre países com relação à produção agroindustrial.

A composição da cana-de-açúcar é de água, açúcares, fibras e sólidos solúveis. Sua produtividade é afetada por vários fatores como: variedade da cana-de-açúcar, clima da região, qualidade da terra, mês de colheita, idade do último corte, entre outros. Associa-se a estes fatores outros que interferem na decisão como a elevação do custo da terra e escassez de produção pela necessidade do aproveitamento por outros cultivos da base alimentar, da base florestal, etc.

Assim a busca do melhor aproveitamento da terra e do produto desta terra torna-se essencial. Este aproveitamento leva em conta vários fatores inclusive a forma de processamento e o preço dos dois produtos principais deste cultivar: o açúcar e o etanol que muitas vezes trocam de posição com relação à margem de retorno.

1.6. VIABILIDADE E IMPORTÂNCIA

A viabilidade do estudo é percebida através de um conjunto de fatores que são: a confiabilidade dos dados que foram fornecidos pelo departamento responsável pela programação de colheita da usina; comprometimento e acompanhamento na construção dos modelos e disponibilidade do software SOLVER fornecido pela Frontline Systems, Inc de programação linear para execução dos modelos.

O setor de cana-de-açúcar apresenta importância notável no cenário econômico nacional. A construção do modelo implica em melhor uso dos recursos disponíveis na usina. A ferramenta desenvolvida tem aplicabilidade em outras usinas. Todos estes fatores aqui citados mostram a relevância do assunto estudado.

Os modelos foram construídos utilizando a planilha eletrônica Excel™ pois apesar das limitações quanto ao número de restrições e variáveis é uma ferramenta amplamente difundida. Vale ressaltar que esta restrição quanto ao número de variáveis foi largamente diminuída devido ao Solver™, que é uma ferramenta que foi disponibilizada pelo CTI para desenvolvimento do modelo. Segundo o SEBRAE, o Excel™ está presente em 70% das empresas que são informatizadas. Por apresentar uma interface mais acessível ao usuário foi a ferramenta escolhida para o desenvolvimento dos modelos.

A usina de açúcar e etanol em estudo produz açúcar tipo VVHP e etanol anidro e hidratado, não possui nenhuma marca vinculada à produção diretamente. Fornece basicamente açúcar para exportação e etanol para o mercado interno. Existe uma variação de acordo com os preços praticados no exterior e no mercado interno, mas no ano em estudo foi este o cenário. Assim, como seus produtos são commodities básicas e seus preços são determinados pelo mercado mundial, o foco de todo o grupo é fornecer um produto dentro dos padrões de qualidade ideais ao menor custo possível. A importância do trabalho seria encontrar uma forma de aumentar a produtividade de todo o canavial para que a produção total seja maior, no intuito de amortizar os custos. Com a mesma quantidade de área disponível, conseguir uma produtividade maior é o objetivo do trabalho.

1.7. CONTEÚDO DO TRABALHO

Capítulo 1: Este capítulo seria uma introdução ao tema proposto. Inicia-se com uma breve apresentação do estudo e segue com os principais objetivos do trabalho, justificativa, viabilidade e um planejamento de execução do trabalho.

Capítulo 2: O capítulo seria toda a revisão de literatura e conceitos sobre os temas de cana-de-açúcar e programação linear. O sub-capítulo referente a cana-de-açúcar inicia-se com uma apresentação do que é a cana-de-açúcar e seus principais constituintes. Apresenta também um breve histórico da cultura da agroindústria canavieira, perspectivas para o etanol e cana-de-açúcar e termina com novas tecnologias e desenvolvimento do setor. O sub-capítulo referente à programação linear começa com a apresentação sobre esta ferramenta de suporte a tomada de decisão, passa pelo processo de modelagem, processo de resolução de um problema e termina com os fundamentos da programação linear.

Capítulo 3: Neste capítulo é feito o método de pesquisa do estudo de caso. O capítulo se inicia com uma apresentação trabalho e seus principais conceitos que serão de vital importância no entendimento dos modelos e resultados. Os outros sub-capítulos: função objetivo, restrições, delimitações do modelo e descrição dos modelos são as partes que constituem os modelos feitos.

Capítulo 4: É o capítulo que apresenta os resultados dos modelos desenvolvidos e algumas análises feitas sobre o estudo como um todo. É dividido em cinco sub-capítulos que são: Resultado da safra 08/09; Resultado do modelo de apresentação; Resultado dos modelos com base no histórico de colheita; Resultado dos modelos com base de dados da safra 08/09; Análises. Os quatro primeiros mostram o desempenho real da safra e o resultado dos modelos feitos. O último sub-capítulo mostra as análises dos resultados obtidos.

Capítulo 5: Neste capítulo foram apresentadas as conclusões do estudo e sugestão para trabalhos futuros na área de programação linear na colheita de cana-de-açúcar.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O capítulo de revisão da literatura foi dividido em dois sub-capítulos que são a revisão do estudo da cana-de-açúcar e revisão do conceito de programação linear. O capítulo foi dividido desta forma pois o objeto de estudo seria a utilização da programação linear na otimização da colheita de cana-de-açúcar. Por se tratarem de dois assuntos distintos, foi assim dividido para facilitar a leitura e entendimento.

2.1. REVISÃO DO ESTUDO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma planta da família das gramíneas (*Saccharum officinarum* L.) cultivada nas regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, ela é a base para a produção de açúcar, etanol e outros subprodutos. A cana é plantada e quando atinge seu ponto de maturação, está pronta para o corte, que pode ser realizado de forma manual ou mecânica. Então, ela é transportada até as usinas para ser processada. Antes de seu processamento ela passa pela pesagem, amostragem, análise de qualidade, descarregamento para, então, ser moída. Depois passa pelo processo de extração do caldo, seguindo para a fabricação de açúcar ou de etanol. Sua composição química é apresentada na Tabela 1 e os seus principais constituintes estão indicados na Tabela 2.

Composição	Teor (%)
Água	65 – 75
Açúcares	11 – 18
Fibras	8 – 14
Sólidos Solúveis	12 – 23

Tabela 1: Composição química da cana-de-açúcar (fonte: Caderno Copersucar, 1988)

Constituintes	Sólidos solúveis (%)
Açúcares	75 – 93
-Sacarose	70 – 91
-Glicose	2 – 4
-Frutose	2 – 4
Sais	3 – 5
-Ácidos inorgânicos	1,5 -- 4,5
-Ácidos orgânicos	1,0 -- 3,0
Proteínas	0,5 -- 0,6
Amido	0,001 -- 0,05
Canas	0,3 -- 0,6
Ceras e graxas	0,005 -- 0,15
Corantes	3 – 5

Tabela 2: Constituintes da cana-de-açúcar (fonte: Caderno Copersucar, 1988)

2.1.1. Breve histórico da agroindústria sucroalcooleira no Brasil

Tendo se iniciado no século XVI o complexo agroindustrial constitui-se uma das mais antigas atividades econômicas do Brasil. Nela o cultivo da cana de açúcar se tornou a primeira atividade produtiva organizada pelo colonizador português. Até o início XVIII a atividade era preponderante dentre as demais culturas. A estagnação do setor açucareiro nacional perduraria durante o século XIX quando, como fator agravante da crise, foi viabilizada a produção de açúcar de beterraba pelos países europeus. Durante o século XX, o Brasil se manteve periférico em termos da participação global no mercado internacional deste produto mesmo com a transformação dos antigos engenhos em usinas de açúcar. Assim, a sobrevivência do setor baseou-se no mercado interno, sendo a exportação apenas uma forma de escoar a produção doméstica excedente. (SHIKIDA, 1998)

Posteriormente à Revolução de 1930 e à crise de 1929, a intervenção do Estado na agroindústria canavieira foi consolidada com a criação, a partir do Decreto no 22.789 de 1 de julho de 1933, do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) como entidade autárquica, com atribuições de planejamento e de intervenções na economia do setor. Essa intervenção do Estado foi instaurada sob forte apelo dos produtores do setor. A ameaça da ruína dessa economia devido à super produção, à queda do preço interno e das exportações, levaram representantes dos usineiros, dos proprietários de engenhos e dos fornecedores de cana a procurarem o Estado em prol da intervenção (SHIKIDA, 1998).

Dentro de uma concepção que previa uma forte presença do Estado na economia e na sociedade, foi criado nos anos 1940 o Estatuto da Lavoura Canavieira (Decreto Lei nº 3.855 de 21/11/1941) que criava regulamentações nas relações entre as usinas e os fornecedores de cana-de-açúcar, e entre estes e os trabalhadores canavieiros. Nos início dos anos 1950, a economia açucareira brasileira sofreu importantes alterações na distribuição regional da produção e começaram a ocorrer novos movimentos modernizadores da economia açucareira no Brasil. O grande impulso ao setor açucareiro brasileiro, contudo, ocorreu na década de 1960.

O mercado internacional do açúcar permaneceu bastante aquecido durante a década de 1960 e começo dos anos 1970. Contudo, o mercado açucareiro, dadas suas características de produto básico da economia, é de se esperar que após um dado período de elevação de preços estes venham a declinar mediante o ingresso de novos produtores e pela expansão da área e da escala de produção das unidades já operantes, estimuladas, por sua vez, pelo próprio processo de maior lucratividade. Tais tendências manifestaram em 1975, quando ocorreu um forte declínio do preço do açúcar no mercado internacional. Esta queda, por outro lado, também se associou à própria crise da economia mundial na segunda metade dos anos 1970, quando eclodiu o primeiro choque do petróleo.

Como a economia brasileira era, e ainda é, dependente da utilização do petróleo, houve grande necessidade de encontrar fontes alternativas de energia que pudessem substituí-lo.

Assim, o Programa Nacional do Álcool, Proálcool ou PNA, foi criado com a intenção de solucionar os dois problemas energéticos que atingiam o país da década de setenta. O Proálcool foi instituído com a emissão do Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975, baseando-se, inicialmente, apenas na produção de etanol anidro para mistura nos carros à gasolina. A partir desta data houve um forte apoio do governo para a viabilização do Proálcool na forma de financiamentos, subsídios e, principalmente, pelo incentivo ao preço do etanol. De 1975 até 1980 o Proálcool recebeu um investimento de cerca de US\$ 1,02 bilhão, sendo 75% desta quantia provenientes de recursos públicos e 25% de recursos

privados (SHIKIDA, 1998). Os instrumentos básicos para a implementação do Proálcool consistiam:

- Na determinação de preços remunerados ao etanol, pela paridade com o preço do açúcar;
- Na garantia da compra do produto pela Petrobrás;
- Na criação de linhas de crédito para o financiamento das partes agrícolas e industriais (SHIKIDA, 1998).

Após um período fértil para o Proálcool inicia-se, no ano de 1985, uma fase de crise começando pela diminuição dos investimentos no Programa. Entre 1985 e 1990 foram investidos cerca de US\$ 511 milhões, dos quais 39% provenientes de capital público e 61% de capital privado. A partir da safra de 1986/87 começa a despontar a crise no abastecimento de etanol.

As características estruturais básicas do complexo canavieiro nacional, no início dos anos 1990, herdadas da longa fase de planejamento e controle estatal, podiam ser assim resumidas: produção agrícola e fabril sob controle das usinas, heterogeneidade produtiva (especialmente na industrialização da cana), baixo aproveitamento de subprodutos e competitividade fundamentada, em grande medida, nos baixos salários e na expansão extensiva da produção. As diferenças técnicas eram enormes quando se comparava a região Norte-Nordeste com a Centro-Sul e, mesmo dentro das regiões, existiam diferenças acentuadas de produtividade e escala de produção (BELIK E VIAN, 2002).

Para o entendimento da situação do setor, a desregulamentação do setor sucroalcooleiro brasileiro também deve ser levada em consideração. Primeiramente, ocorreu a liberação do preço do açúcar em dezembro de 1991. Em maio de 1997 iniciou-se a desregulamentação dos preços do etanol anidro e, em fevereiro de 1999, a liberação dos preços do etanol hidratado e da cana (BELIK E VIAN, 2002).

Em decorrência de toda essa situação desfavorável ao setor, os empresários sentiram a necessidade de avaliar o modo de produção agrícola e industrial e encontrar soluções

técnicas para diminuir os custos e aumentar o lucro. Neste posicionamento da agroindústria canavieira, tem-se observado a introdução de novas tecnologias e inovações organizacionais para tornar o açúcar e o etanol mais competitivos e também explorar as novas opções para uso dos seus subprodutos.

Em 2003, com o advento dos veículos flex-fuel, e com a grande aceitação desses por parte dos consumidores, houve um reaquecimento no consumo de etanol hidratado no mercado interno, o que abre um novo horizonte para a expansão da agroindústria da cana no Brasil. Esta tecnologia, além de modificar o perfil da produção brasileira de automóveis, pode resgatar a confiança do consumidor no etanol etílico hidratado, ao oferecer ao proprietário deste veículo a opção de uso da gasolina ou/e etanol hidratado, optando pelo combustível que tiver melhor preço, qualidade, características de desempenho, consumo ou mesmo disponibilidade. A tecnologia do bicombustível pode ser resumida por um sistema capaz de identificar o combustível colocado à disposição para a combustão e promover a calibração da quantidade de combustível e o tempo certo de ignição, para que a queima seja feita dentro dos parâmetros técnicos desejados. O sistema flex-fuel possibilita rápido ajuste da operação do motor às características do combustível. O veículo flex-fuel representa uma notável evolução tecnológica da indústria automotiva brasileira, a qual abre perspectivas para expansão consumo no mercado interno de etanol hidratado.

Impulsionados principalmente pelas questões ambientais relativas ao aquecimento global (entre as quais, no curto prazo, o cumprimento das metas definidas pelo Protocolo de Quioto), relativas à substituição do MTBE (Bioéter Metil-terc-butílico) e pela insegurança no suprimento de combustíveis fósseis (face à grande elevação dos preços do petróleo), nos últimos anos diversos países intensificaram a importação de etanol anidro (principalmente brasileiro) para, adicioná-lo à gasolina. Assim, em 2004 as exportações de etanol no Brasil atingiram o volume de 2,4 bilhões de litros (LOVATELLI, 2008).

2.1.2. O Setor Sucroalcooleiro no Brasil

Durante a Safra 2006/2007 o Brasil moeu 426 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e produziu 32,4 milhões de toneladas de açúcar e 17,7 milhões de m³ de álcool. Na mesma Safra, o Brasil exportou um total de 21,4 milhões de toneladas de açúcar,

representando aproximadamente 44% das exportações de açúcar do mundo (USINA SÃO MARTINHO, 2008).

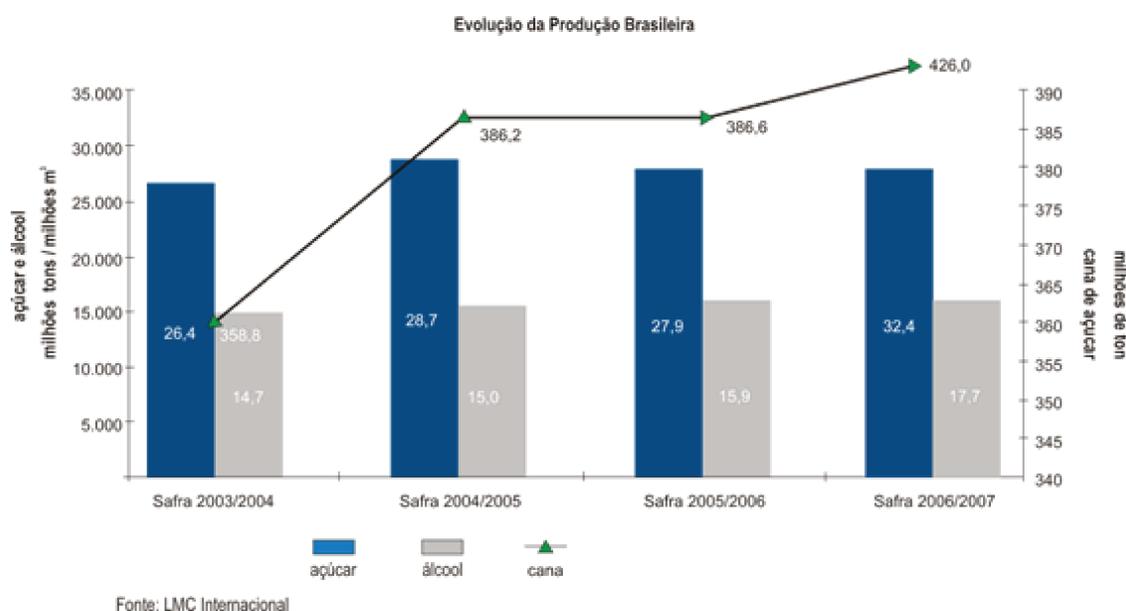


Figura 1: Evolução da produção brasileira de açúcar e etanol (fonte: LMC Intenacional, 2008)

A cultura da cana-de-açúcar espalha-se pelas regiões centro-sul e norte-nordeste do Brasil, possibilitando ao país apresentar dois períodos de safra (uma em cada região), e ocupa 4,1% de área total cultivável do solo brasileiro. Na Safra 2006/07, a região centro-sul representou cerca de 90% da produção brasileira (86,2% da produção de açúcar e 90,4% da produção de etanol) e abrigava 251 das 325 unidades industriais sucroalcooleiras em operação, número que deve se expandir na próxima safra (USINA SÃO MARTINHO, 2008).

Ainda segundo a empresa, o vasto território do Brasil e seu clima favorável possibilitam uma grande oferta de terras disponíveis para a produção de cana-de-açúcar. As condições favoráveis do Brasil permitem que a cana-de-açúcar seja colhida entre cinco e seis vezes antes que seja necessário replantar, o que representa uma grande vantagem se comparado com outros países, como a Índia, por exemplo, onde em média a cana-de-açúcar precisa ser replantada a cada duas ou três colheitas. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia e China, tendo produzido 426 milhões de toneladas na Safra 2006/07. O ciclo de plantio da cana-de-açúcar oferece vantagens significativas quanto

ao custo em relação à beterraba, que precisa ser replantada todos os anos e exige rotação de colheita que varia de três a cinco anos.

2.1.3. O açúcar e o etanol

O açúcar é um produto de consumo básico e uma commodity essencial produzida em várias partes do mundo, feito a partir da cana-de-açúcar (responsável por 70% da produção mundial) e da beterraba, cuja fabricação passa por processos industriais e agrícolas e cuja produção requer o uso intensivo de mão-de-obra e de capital. A produção e o consumo de açúcar cresceram nos últimos 10 anos, atingindo, respectivamente, cerca de 164,9 milhões de toneladas e 151,1 milhões de toneladas na Safra 2006/07, e deverão continuar aumentando devido ao crescimento vegetativo da população, ao aumento do poder aquisitivo dos consumidores e do consumo de alimentos processados em todo o mundo (USINA SÃO MARTINHO, 2008).

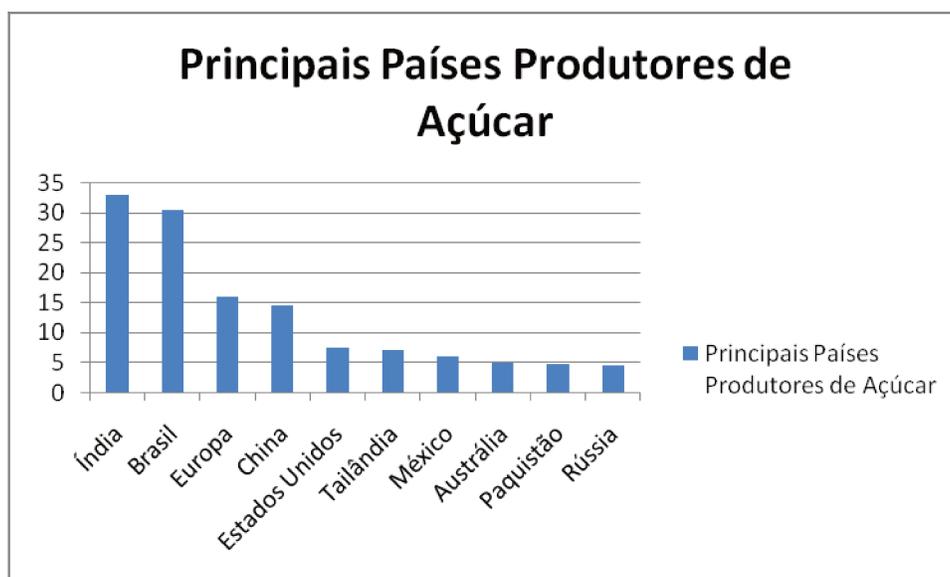


Figura 2: Principais produtores mundiais de açúcar (fonte: LMC International, 2008)

Segue abaixo oferta e demanda de açúcar nos últimos anos:

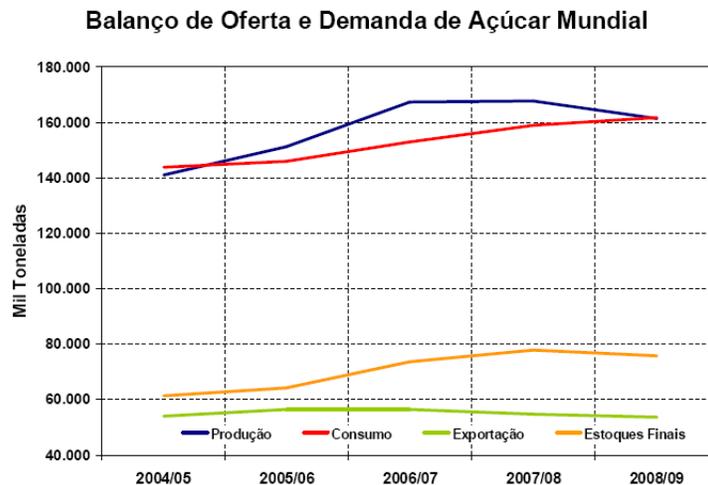


Figura 3: Balanço de Oferta e Demanda do Açúcar Mundial (fonte: LMC International, 2008)

A produção de etanol tem tido destaque especial nos últimos tempos, por ser esse um combustível renovável que tem condições de substituir a matriz energética atual. Portanto, para o Brasil, com suas potencialidades de terra e clima, abre-se um leque promissor de oportunidades. (LOVATELLI, 2008)

O mercado mundial de etanol ainda está em estágio inicial de desenvolvimento e aproximadamente 75,0% de todo o etanol consumido no mundo é utilizado como combustível. Ele tem sido favorecido pelas preocupações e iniciativas ambientais que vêm aumentando a consciência da necessidade de reduzir o consumo mundial de combustíveis fósseis e adotar combustíveis menos poluentes, como o Protocolo de Quioto (USINA SÃO MARTINHO, 2008).

Segue abaixo figura que ilustra os principais produtores de etanol no mundo:

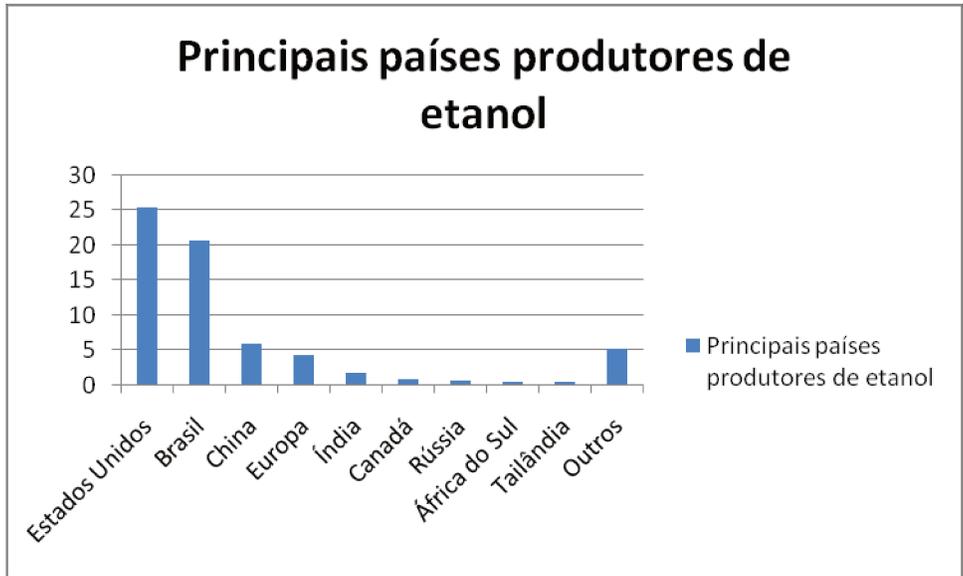


Figura 4: Principais países produtores de etanol (fonte: LMC International, 2008)

Segue abaixo histórico e projeção da demanda de etanol:

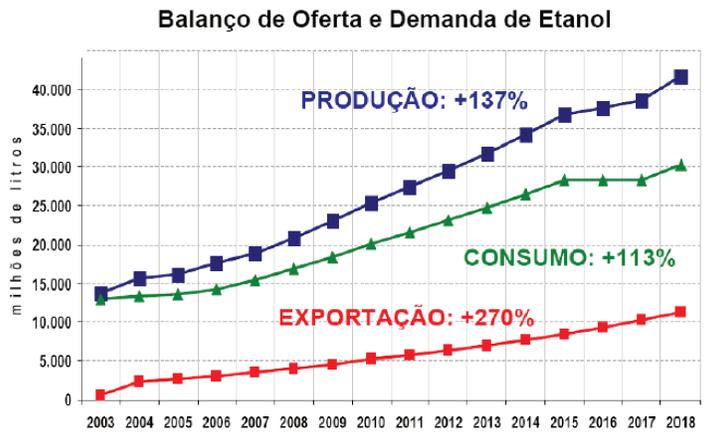


Figura 5: Balanço de oferta e demanda de Etanol (fonte: LMC International, 2008)

Os Estados Unidos é o maior produtor mundial de etanol seguido pelo Brasil. Os Estados Unidos produzem o etanol a partir do milho e não da cana-de-açúcar. Apesar de ser o maior produtor de etanol do mundo, não consegue suprir sua demanda e compra etanol brasileiro.

2.1.4. Perspectivas para o futuro do etanol brasileiro

A participação do etanol na matriz energética brasileira, em particular no que se refere ao transporte rodoviário, registrou expressivo crescimento nos últimos anos. Esta participação deverá intensificar-se a médio e longo prazos, em virtude de alguns fatores como: Substituição de fontes energéticas não renováveis por fontes renováveis de energia, desenvolvimento de novos produtos tendo como matéria-prima a cana-de-açúcar(alcoolquímica) e principalmente a redução no aquecimento global. (Milanez et al, 2008)

Em consequência das perspectivas favoráveis para o etanol no Brasil como foi citado acima, verificou-se nos últimos anos, aumento muito significativo da demanda por recursos do BNDES destinados a financiar a expansão da produção deste combustível. A criação do Departamento de Biocombustíveis (DEBIO) em agosto de 2007 foi devido ao alto volume de tais financiamentos que geraram desembolsos de aproximadamente de R\$ 3,5 bilhões em 2007 e R\$ 6 bilhões em 2008 (Milanez et al, 2008).

O Brasil possui uma posição privilegiada no que se refere à produção de biocombustíveis em virtude da conjugação de dois fatores: a grande extensão territorial e o clima tropical. Isso é particularmente verdadeiro no que diz respeito à produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar, na qual a liderança do país, estabelecida há décadas, foi consolidada recentemente com a introdução do motor flexível. Trata-se de uma tecnologia bem-sucedida, mesmo do ponto de vista comercial, o que é comprovado pela participação de quase 90% das vendas de automóveis e comerciais leves em 2007 (até novembro). A frota atual pode ser considerada equivalente às vendas acumuladas, que somaram 4,4 milhões de unidades nesta data.

As projeções de demanda de acordo com Milanez et al (2008) do etanol consideram um horizonte temporal de 2015, em face da grande incerteza inerente a prazos mais longos. As premissas serão acompanhadas de breves comentários. O consumo médio de etanol e gasolina foi estimado com base em estatísticas da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e Anfavea.

- Álcool industrial: produção constante até 2010 e crescendo 10% ao ano até 2015, por conta do aumento esperado da difusão da alcoolquímica.
- Mercado externo: crescimento de 5% ao ano até 2015. Os critérios utilizados para esse segmento foram conservadores em relação ao que especialistas do assunto esperam.

Etanol destinado ao mercado automotivo:

- Veículos a diesel e importados: não foram considerados nas projeções, em virtude de sua participação muito pequena;
- Veículos com motor a etanol: redução em 50% da frota até 2015, mantendo-se constante o consumo de etanol hidratado por veículo. O sucateamento é justificado pela elevada idade média da frota;
- Veículos com motor a gasolina: redução de 20% da frota até 2015, supondo constante o consumo por veículo e constante a proporção de 25% de etanol (anidro) misturado à gasolina;
- Veículos com motor flexível: trata-se do segmento crítico para a demanda futura de etanol. De fato, além de sua participação na frota total ser crescente, a versatilidade dos motores flexíveis significa que seu consumo projetado deverá oscilar fortemente entre o álcool (hidratado) e a gasolina, conforme a relação entre os preços dos dois combustíveis.

As premissas para a demanda projetada desse segmento são as seguintes:

- Crescimento da frota de 7% ao ano, com base no cenário médio da Anfavea para as vendas internas;
- Vendas internas desprezíveis, a partir de 2008, de veículos a gasolina e a álcool, ou seja, todos os veículos leves terão motores flexíveis;
- O sucateamento de veículos a motor flexível será desprezível no período considerado (2008–2015).

Com o intuito de atenuar a grande incerteza inerente a projeções dessa natureza, foram adotados dois cenários para a participação do álcool hidratado na mistura utilizada pelos veículos flex: 50% e 75%. A projeção foi feita levando em conta que o conteúdo

energético do álcool equivale a aproximadamente 70% do da gasolina e que esta contém cerca de 25% de álcool em volume.

A tabela abaixo mostra o resultado das projeções:

Demanda de Etanol Brasileiro

(Em bilhões de litros)

Cenário 1 (50% de etanol)									
<i>Destinação</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>
<i>Hidratado (carro a álcool)</i>	5,8	5,3	4,9	4,5	4,2	3,8	3,5	3,2	3
<i>Hidratado (carro flex)</i>	3,2	4	5,4	6,8	8,4	10,1	11,8	13,8	15,8
<i>Anidro (carro flex)</i>	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,1	2,5	2,9	3,3
<i>Anidro (carro a gasolina)</i>	5,5	5,4	5,2	5	4,9	4,7	4,6	4,5	4,3
<i>Industrial</i>	1	1	1	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
<i>Exportações</i>	4,4	4,6	4,9	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,5
Total	20,4	21,1	22,5	23,8	25,6	27,5	29,6	32,1	34,5
Cenário 2 (75% de etanol)									
<i>Destinação</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>
<i>Hidratado (carro a álcool)</i>	5,8	5,3	4,9	4,5	4,2	3,8	3,5	3,2	3
<i>Hidratado (carro flex)</i>	3,2	6	8,1	10,3	12,6	15,1	17,8	20,6	23,7
<i>Anidro (carro flex)</i>	0,5	0,4	0,6	0,7	0,9	1	1,2	1,4	1,6
<i>Anidro (carro a gasolina)</i>	5,5	5,4	5,2	5	4,9	4,7	4,6	4,5	4,3
<i>Industrial</i>	1	1	1	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
<i>Exportações</i>	4,4	4,8	5,3	5,9	6,4	7,1	7,8	8,6	9,4
Total	20,4	22,9	25,1	27,4	30,1	32,9	36,2	39,8	43,6

Tabela 3: Demanda do etanol brasileiro (fonte: MILANEZ et al, 2008)

Estas projeções foram feitas em 2008 por pesquisadores do BNDES e não contemplam os tempos de crise que o mundo está atravessando neste momento. Entretanto, estas projeções são válidas pois o mundo continua em busca de meios de energia renovável e o etanol e os subprodutos da cana-de-açúcar como um todo são vistos como um dos principais substitutos da atual matriz energética mundial. O número de investimentos e novas usinas mostram o otimismo em relação ao futuro do setor.

2.1.5. A cana-de-açúcar e o etanol como fonte de energia

O uso do etanol como combustível no Brasil atingiu 13,4 milhões de m³ em 2006 (a produção foi de 17,7 milhões de m³), cerca de 40% do combustível usado em motores automotivos (ciclo Otto). A Agroindústria de cana gerou também 11,3 TWh de energia elétrica e mecânica, na maioria para uso próprio (o que equivale a 3% de toda a energia elétrica consumida no país). O uso do bagaço como combustível foi de 20,2 M tep (toneladas equivalentes de petróleo). (UNICA, 2009)

De acordo com a Unica (2009) o Brasil atingiu em 2006 a sua auto-suficiência em petróleo, com a produção de cerca de 1,8 a 1,9 milhões de barris/dia (bep/dia). Essa auto-suficiência conta com a expressiva contribuição do setor de cana-de-açúcar, que atingiu 14,6% da oferta interna de energia (2006). Em 2005, o etanol participou com cerca de 160.000 bep/dia (13% da energia total para transportes), e os usos do bagaço como combustível industrial (alimentos como açúcar, cítricos e outros) e no setor de energia (produção de etanol) atingiram cerca de 410.000 bep/dia. Destes, cerca de 63% são usados diretamente como combustível no setor industrial (alimentos): 260.000 bep/dia; no setor industrial, o bagaço fornece tanta energia quanto a soma do óleo combustível e gás natural juntos.

Portanto, mesmo deixando de fora a energia térmica a partir do bagaço, usada para a produção do etanol (cerca de 150.000 bep/dia), o setor de cana-de-açúcar auxilia os transportes e a indústria com a substituição de 420.000 bep/dia de combustíveis (gasolina, óleo combustível ou gás natural).

2.1.6. Novas tecnologias e desenvolvimento do setor

Além das ações para forte difusão de tecnologias já comerciais, a inovação em processos para a produção de etanol e uma diversificação de produtos (a partir da sacarose e de resíduos lignocelulósicos da cana) devem ocorrer.

Em 2000, foi estimado que a implementação adicional de tecnologias já comerciais poderia resultar em reduções de até 13% em custos de produção no Centro-Sul.

Processos novos incluem a “agricultura de precisão”; sistemas integrados de colheita e transporte de cana e palha; maior automação industrial; novos processos de separação do caldo e processamento final. A modificação genética da cana está avançando muito rápido no Brasil (escala experimental, incluindo testes de campo); o genoma da cana foi mapeado em 2001 em São Paulo e algumas dezenas de projetos (aplicações: genoma funcional) estão em desenvolvimento em instituições públicas e privadas.

Todo o desenvolvimento dos modelos foi possível devido à quantidade de informações que a usina possuía. Isso é possível devido a uma grande automação dos equipamentos industriais e agrícolas presentes na usina.

Há uma crescente busca na diversificação dos produtos de sacarose que são fabricados em novas indústrias anexas ou não às usinas e também da alcoolquímica que já é uma realidade principalmente na fabricação do plástico verde. A produção de energia da biomassa da cana é outra crescente. Esta biomassa pode ser recuperada a custos relativamente baixos e menos da metade é usada hoje. Esta diversificação dos produtos buscada pelas usinas gera um valor adicional nas vendas significativo. (LOVATELLI, 2008)

2.2. REVISÃO DO CONCEITO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

O conceito de pesquisa operacional é a modelagem matemática de problemas reais. Segundo Angeloni (2003) a pesquisa operacional era utilizada na área militar para o cálculo de suprimentos e armas e passou a ter aplicabilidade na área civil a partir da segunda guerra mundial. Os problemas com variáveis estáticas que não apresentam aleatoriedade são chamados determinísticos. Os problemas determinísticos são classificados em duas categorias que são os problemas de programação linear e programação não-linear.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho utilizam os conceitos de programação linear e foram resolvidos pelo algoritmo simplex. As partes constituintes dos modelos, todo

o processo de identificação e resolução do problema e fundamentos da programação linear serão detalhados nos sub-capítulos seguintes.

2.2.1. O processo da tomada de decisão

O processo de tomada de decisão segundo Angeloni (2003) tem como subsídios essenciais o *dado*, a *informação* e o *conhecimento*, definindo *dado* como um elemento bruto, sem significado e desvinculado da realidade, já a *informação* consiste em um dado dotado de significado, apresentando assim relevância e propósito; o *conhecimento* por fim é considerado como a informação processada pelo indivíduo, ou seja, convertida em um conjunto de ações a serem implementadas.

Assim, no processo de tomada de decisão, a disponibilidade de dados, informações e conhecimentos são muito importantes, no entanto tais conhecimentos estão dispersos, fragmentados e armazenados na mente dos especialistas, sofrendo a interferência de seus modelos mentais.(ANGELONI, 2003).

Lachtermacher (2006) destaca esta dificuldade em identificar e organizar os dados encontrados no ambiente de decisão atual e sugere a construção de modelos computacionais como uma alternativa em situações na qual estão presentes propostas conflitantes e concorrentes, nas quais a opção usual seria somente o uso de um modelo mental preexistente no especialista. Por modelos computacionais entende-se um conjunto de relações matemáticas e hipóteses lógicas, implantadas em um computador de tal forma a representar um problema real de tomada de decisão.

2.2.2. Revisão do Conceito de Programação Linear

A programação linear nada mais é que um aprimoramento de uma técnica de resolução de sistema de equações lineares via inversões sucessivas de matrizes, com a vantagem de incorporar uma equação linear adicional representativa de um dado comportamento que deva ser otimizado. (CAIXETA FILHO, 2004)

Para a formulação do problema, segundo o autor, existem alguns passos básicos, como:

- a) Deve ser definido o objetivo básico do problema – que a princípio deve ser único – com respeito a otimização a ser perseguida. Por exemplo: maximização do lucro, ou de eficiência, ou de bem-estar social; minimização de custos, ou de tempos, ou de perdas, e assim por diante. Tal objetivo será assim representado por uma função objetivo, a ser maximizada ou minimizada;
- b) Para que essa função objetivo possa ser matematicamente especificada, as alternativas possíveis para a ocorrência de tal otimização – as chamadas variáveis de decisão envolvidas – deverão ser definidas. Por exemplo, os tipos de cultura e/ou área a serem explorados; as classes de investimento à disposição de um tomador de decisão, alocação de hora-máquina, etc. Normalmente, convencionou-se que todas essas variáveis possam assumir somente valores positivos;
- c) Tais variáveis podem estar sujeitas a uma série de limitações – também conhecidas como restrições do problema -, normalmente representadas por inequações. Por exemplo, limitações referentes à área total disponível, às exigências nutricionais para determinado rebanho, à disponibilidade de capital e mão-de-obra, etc.

2.2.3. O processo de modelagem

Durante o processo de decisão sempre existe a situação onde uma decisão deve ser tomada entre uma série de alternativas conflitantes e concorrentes. Nesse caso, duas opções básicas se apresentam, que seria utilizar a intuição gerencial ou realizar um processo de modelagem da situação e realizar exaustivas simulações dos mais diversos cenários de maneira a estudar mais profundamente o problema.

A primeira opção até recentemente se constituía uma única alternativa viável pois os dados e informações muitas vezes não eram confiáveis ou muitas vezes não existiam e também não havia poder computacional para resolver os problemas. Com o surgimento dos microcomputadores e com o aprimoramento da tecnologia de banco de dados, esta deixou de ser a única opção para os tomadores de decisão. Um número cada vez maior de

empresas e tomadores de decisão começaram a optar pela segunda opção que seria a elaboração de modelos para auxiliar o processo devido principalmente a complexidade dos fatores envolvidos e o grande número de variáveis.

Segundo Lachtermacher (2006), a realidade, atualmente, o que está ocorrendo é o inverso do que ocorreu 20 anos atrás. A maioria dos tomadores de decisão está mudando a maneira de agir devido a dois fatores principalmente:

- Excesso de informações disponíveis. Com a internet, o problema é o contrário do que acontecia anteriormente, a quantidade de informação é tão grande que é necessário filtrar as informações necessárias e relevantes de maneira a modelar a situação para poder analisá-la.
- Muitos gerentes acabam tomando suas decisões sempre com base nos dados e respostas de modelos e deixam de utilizar a sua intuição e esta base de conhecimentos intrínseca aos tomadores de decisão acaba sendo desperdiçada.

Portanto, é importante utilizar um modelo para equacionar todas as variáveis e restrições de um problema, desde que o conhecimento do gerente do processo ou tomador de decisão na oportunidade sirva para a geração de cenários e análise das soluções encontradas.

2.2.4. Processo de Resolução de um Problema

O processo de resolução de um problema apresenta cinco etapas consecutivas que podem, entretanto, se repetir dependendo da situação. Cada uma das etapas é essencial para o processo.

A primeira etapa é a identificação do problema. Apesar de parecer uma etapa simples, esta é fundamental pois uma definição inadequada do problema não levará a resposta alguma do modelo ou a conduzirá a uma solução que não seja contundente ou ótima com a realidade em questão.

A segunda etapa é a formulação dos modelos. A formulação do modelo consiste na seleção dos dados relevantes e necessários obtidos na identificação do problema e

montagem do problema em si. A segunda etapa representa uma visão de quem modela o problema que representa a realidade.

A terceira etapa é a análise de cenários. Nesta etapa é de vital importância que o usuário operador do software ou modelo de programação tenha experiência e conhecimento prévio sobre o problema para poder gerar cenários que sejam contundentes e que reflitam a realidade no intuito da resolução do problema. O modelo normalmente considera dados passados e presentes para analisar e decidir sobre situações futuras, portanto associadas a incertezas. A geração de cenários procura identificar caminhos frente a esta incerteza.

A quarta etapa é a interpretação de resultados. Nesta etapa, os decisores analisam os resultados das iterações feitas e julgam a decisão correta ou conveniente.

A última etapa é a implementação e monitoração. Geralmente as variáveis dos problemas apresentam mutabilidade e sempre existe a necessidade de rever as variáveis, restrições e gerar novos cenários para acompanhamento da situação. (LACHTERMACHER, 2006)

Uma situação problemática em um cenário real apresenta variáveis que se transformam e precisam ser avaliadas rotineiramente. Assim, é necessário adequar as variáveis e restrições no intuito de manter a solução do problema sempre contundente com a realidade.

2.2.5. Fundamentos da programação linear

A programação linear foi estabelecida em termos matemáticos por G. B. Dantzig em 1947, para ajudar a resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. Posteriormente, para generalizar os procedimentos de solução aplicada a grande número de variáveis e restrições, Angeloni (2003) apresentou uma técnica denominada Método Simplex. Este método trata de um procedimento algébrico que fornece a solução exata a qualquer problema de Programação Linear e tem a capacidade de indicar se o problema possui solução, se não tem solução ou se tem infinitas soluções.

A difusão da técnica de Programação Linear foi bastante rápida, principalmente com o advento do computador. O uso da PL permitiu alcançar um considerável aumento na eficiência dos recursos dos processos de produção. Sem dúvida, é a técnica de otimização mais empregada na indústria, no comércio, na agricultura e no setor público, chegando a render um prêmio Nobel na área de Economia, em 1975, na resolução de um problema econômico de alocação de recursos.

Lachtermacher (2002) assim descreve um problema de programação linear:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Otimizar:} & z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 \text{Sujeito a:} & \left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{array} \right\}
 \end{array}$$

Onde:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n, \text{ para } i = 1, \dots, m$$

Nesta descrição temos: z é a função objetivo a ter o seu valor otimizado (quer por minimização ou maximização), g_1 a g_m representam as inequações das restrições, que limitam assim a solução do problema, b_1 a b_m representam os valores das restrições, n corresponde ao o número de variáveis de decisão (x_1 a x_n), m ao número de restrições do problema, i ao índice de uma determinada restrição, os termos c_1 a c_n representam coeficientes aplicados a cada uma das variáveis de decisão na função objetivo, já a_{i1} a a_{in} representam os coeficientes aplicados a cada uma das variáveis de decisão nas inequações das restrições.

As técnicas de otimização possuem uma estrutura bastante simples, para representação do modelo. Seguem abaixo, alguns conceitos básicos empregados:

- Função objetivo (F_0): são funções analíticas das variáveis de decisão e parâmetros que expressam o objetivo a ser alcançado.
- Variáveis de decisão: representam os aspectos do problema que podem ser controlados.
- Conjunto de restrições: é o conjunto de equações ou inequações que devem ser satisfeitas pelas condições do problema, representando as limitações dos recursos disponíveis ou exigências que devem ser controladas durante a resolução do problema.
- Soluções factíveis: são aquelas que satisfazem o conjunto de restrições do problema, delimitando a região onde todas as exigências são cumpridas.
- Solução ótima: é a que melhor satisfaz o conjunto de restrições, dentre as soluções factíveis.

3. MÉTODO DE PESQUISA

3.1. APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A Usina Iracema, objeto de estudo, possui uma área de colheita de 21.543,38 ha ou 8.617,35 alqueires paulista. Na extensão total desta área, a usina cultiva cana-de-açúcar com a finalidade de produzir açúcar e álcool.

A usina cultiva dezenas de variedades de cana-de-açúcar que apresentam comportamentos diferentes entre si. Algumas apresentam amadurecimento mais precoce e outras mais tardio conforme analisaremos mais adiante. Todas estas particularidades das variedades somadas a diferentes tipos de solo e restrições das operações de produção fazem com que um planejamento de colheita se torne cada vez mais importante e vital para a melhor produtividade e conseqüentemente melhor resultado como um todo.

A proposta deste estudo de caso é formar um sistema de apoio à decisão de colheita para a usina que contemple as curvas de maturação com base no histórico de colheita de todas as variedades e seu rendimento real em diversas regiões que abastecem a usina.

3.1.1. Conceitos Básicos

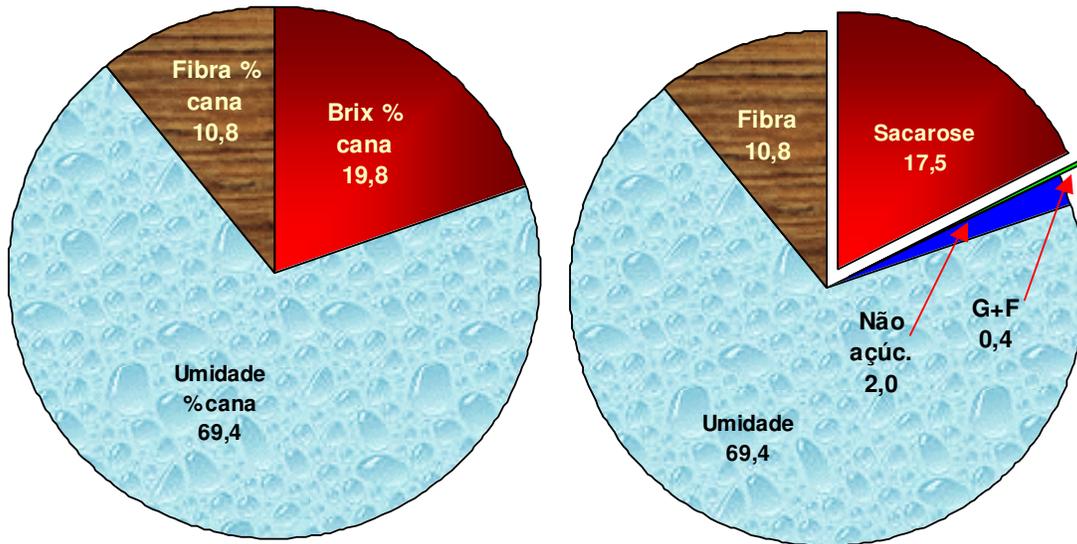
Constituintes da cana-de-açúcar

A cana de açúcar apresenta em sua composição:

- Água;
- Celuloses, pectinas, ligninas;
- Monossacarídeos (glucose, frutose);
- Dissacarídeos (sacarose);
- Oligossacarídeos;
- Polissacarídeos (amido, dextrana);
- Sais Solúveis;
- Compostos nitrogenados (proteínas);

- Ácidos orgânicos;
- Outros.

Segue abaixo gráfico representando as porcentagens do composto de cana-de-açúcar:



G + F = Glucose + Frutose

Figura 6: Composto da cana-de-açúcar (fonte: Caderno copersucar, 1988)

ATR e ART

O índice ART (Açúcar Redutores Totais) é um índice em % que demonstra a quantidade de açúcar presente na cana. É encontrado através da fórmula:

$$\text{ART} = \text{Sacarose}/0,95 + \text{Glucose} + \text{Frutose}$$

Considerando:

- Sacarose igual a Pol da Cana
- Glucose + Frutose igual a Açúcar Redutor (AR),

$$\text{Temos: ART} = \text{Pol}/0,95 + \text{AR} \quad (3.1)$$

A medida de produtividade básica da cana é o ART (Açúcar Total Recuperável) que seria a quantidade em quilogramas de açúcar em relação à uma tonelada de cana colhida. É a medida final que considera as perdas do processo. É a medida para pagamento dos fornecedores de cana para a usina e também será a medida de rendimento das variedades e a função objetivo do nosso estudo.

A relação entre o ART e ATR será descrita a seguir:

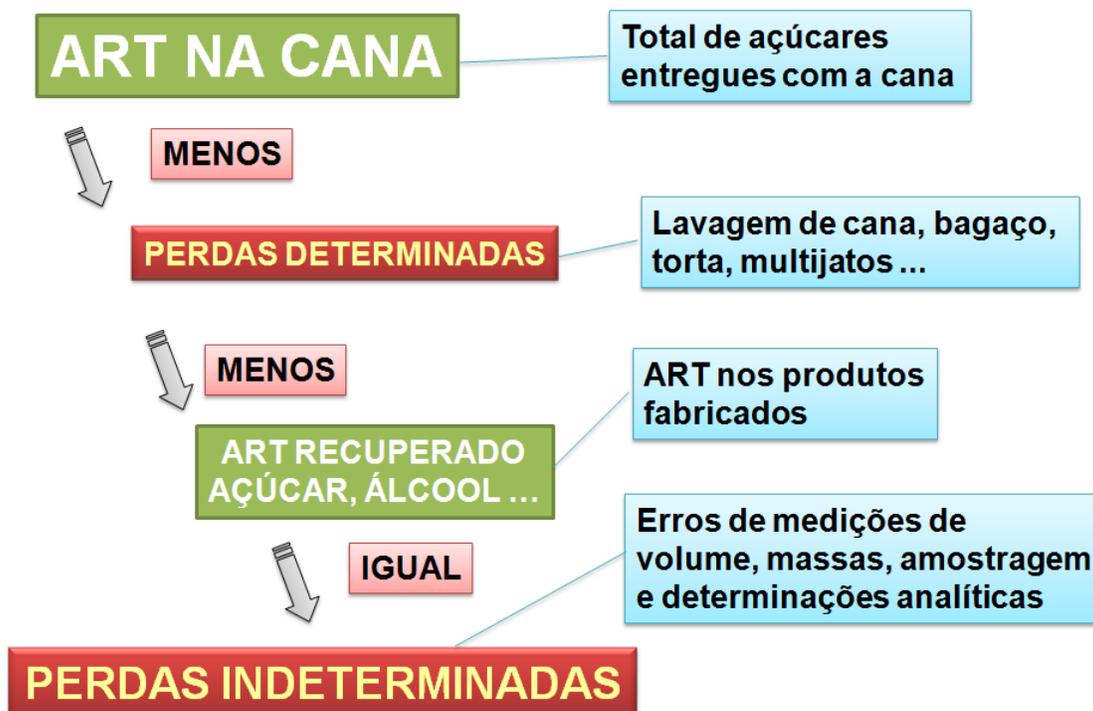


Figura 7: Obtenção de ATR (fonte: Caderno Copersucar, 1988)

Os processos descritos acima representam as perdas de açúcar no processo de fabricação de açúcar e etanol. Abaixo, outro fluxograma do processo de fabricação e o momento detalhado do momento da perda de rendimento.

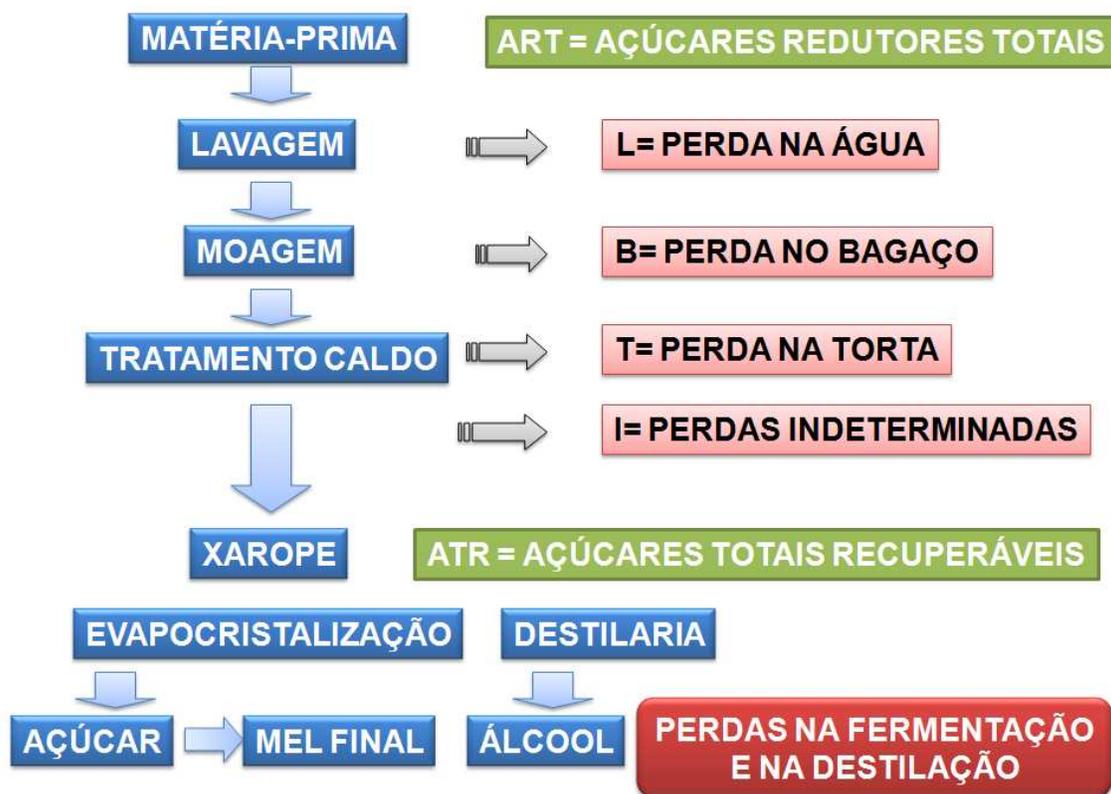


Figura 8: Formação do índice de ATR (fonte: Caderno Copersucar, 1988)

A premissa para o índice ATR é de que existem perdas de 12% no processo.

- Perdas no processo de lavagem da cana
- Perdas no bagaço
- Perdas na torta
- Perdas Indeterminadas

A eficiência considerada no índice é de 88%.

Com tal premissa, o cálculo do ATR (kg / ton cana) é descrito a seguir:

$$\text{ATR} = 10 \cdot \text{Pol} \cdot 1,0526 \cdot 0,88 + 10 \cdot \text{AR} \cdot 0,88 \quad (3.2)$$

$$\text{ATR} = 9,26288 \cdot \text{PC} + 8,8 \cdot \text{AR} \quad (3.3)$$

$$\text{ATR} = 8,8 \cdot (\text{Pol}/0,95 + \text{AR}) \quad (3.4)$$

$$\text{ATR} = 8,8 * \text{AR} \quad (3.5)$$

Assim, o índice utilizado para cálculo de máximo rendimento do canavial é o ATR que seria o resultado considerando as perdas determinadas e indeterminadas do processo.

3.2. FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo será definida como estabelecimento do mix de colheita de variedades que resulte no maior rendimento de ATR Total, pois é o indicador relacionado ao máximo desempenho do canavial. As fazendas foram agrupadas em grandes blocos de acordo com particularidades do solo, do clima e relevo. As variedades foram agrupadas em grupos de acordo com suas curvas de maturação, manejo varietal, soqueira e responsividade de acordo com o solo. A função objetivo de nosso modelo será uma junção entre os blocos de colheita e as variedades que serão descritos a seguir.

3.2.1. Blocos de colheita

Os blocos de colheita são feitos de acordo com a distância que estão da usina e também das condições de solo, relevo, clima da região e restrições em comum.

Os blocos foram divididos da seguinte maneira:

Aspersão: São as áreas ao redor da usina em que a vinhaça chega por canal ou tubulações através da ação da gravidade e bombeamento. Os limitantes desta região são rios ou relevo que fazem com que a tubulação fique impossibilitada de avançar. O solo desta região de alta fertilidade, geralmente de qualidade A e B. E sempre bem irrigado com vinhaça.

Rodotrem: São as áreas que contornam a região da aspersão. Nestas regiões a vinhaça é transportada por caminhão e os solos são predominantemente férteis. Porém, possui em seu bloco regiões de solo classe C.

Boa Vista: A área da Boa Vista é uma área de alta fertilidade e não necessita de complemento nutricional de vinhaça. A opção é aplicar as águas residuárias do processo de

industrialização nesta área. A vinhaça é destinada a outras áreas onde o solo tem fertilidade mais baixa.

Limeira: O bloco de Limeira fica a uma distância de aproximadamente 20 km da Usina e apresenta um relevo um pouco mais acentuado que a região de Aspersão e Rodotrem. Seu solo possui uma característica de ser bem argiloso, ou seja retém muita água. Sua classificação de Solo é média. Possui solos na faixa de B,C e D.

Serra: A bloco da Serra fica em torno de 60 km da Usina e fica em uma região de relevo bastante acentuado com características de solo bastante arenoso, que retém pouca água e altamente restritivo. Classificação do solo é C,D e E.

Sequeiro: As regiões de Sequeiro são as áreas que não recebem nenhuma irrigação e geralmente são áreas que ficam próximas ao perímetro urbano.

3.2.2. Variedades

O plantel varietal do canavial é bem diversificado, possuindo variedades CTCs, RBs, IACs, SPs, etc. A empresa mantém convênio e parcerias com as entidades responsáveis pela criação e formação das variedades e por isso mantém um plantel sempre atualizado de variedades novas e outras plantadas há mais tempo. Todas as entidades IAC, CTC, UfsCar no processo de parceria mantém viveiros experimentais na empresa.

As variedades devido à sua curva de maturação são divididos em 3 grandes grupos: Precoces, médias e tardias, e devido à algumas particularidades todos foram divididos em outros subgrupos.

Os rendimentos com base no histórico de colheita são as médias mensais dos valores de ATR apresentados durante todo o desenvolvimento das variedades. No caso das variedades com o realizado na última safra, os valores que vão ser apresentados abaixo são os resultados da média da variedade em todos os blocos. Como a curva de ATR é considerada padrão a todos os blocos, a formação desta parte deste princípio. Toda quantidade de cana de uma determinada variedade colhida em um mês, independente do bloco é quantificada e o ATR médio do mês é obtido.

As variedades cultivadas na Usina com seus respectivos rendimentos com base no histórico de colheita representado pela sigla ATR Histórico, e real da última safra representado por ATR – Última safra, são apresentadas abaixo:

Variedades precoces – São variedades que possuem um amadurecimento mais rápido que as demais, ideal para serem cortadas no início de safra.

- Grupo 1 – A variedade é considerada uma variedade hiper precoce pois apresenta a curva de amadurecimento mais rápida de todas as variedades. A variedade precisa ser cortada no início de safra. Caso a colheita não aconteça nos três primeiros meses ela perde muita qualidade e produtividade, ficando muito deficiente para os próximos anos, por isso o gráfico apresenta rendimento zero em outros meses. Variedade nova, em fase de desenvolvimento.

Variedade - RB 855156

Curva de Maturação Teórica:

Mês	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	117,31	122,63	136,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ATR - Última safra	118,19	117,91	127,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 4: Rendimento Histórico e da última safra do grupo Precoce 1

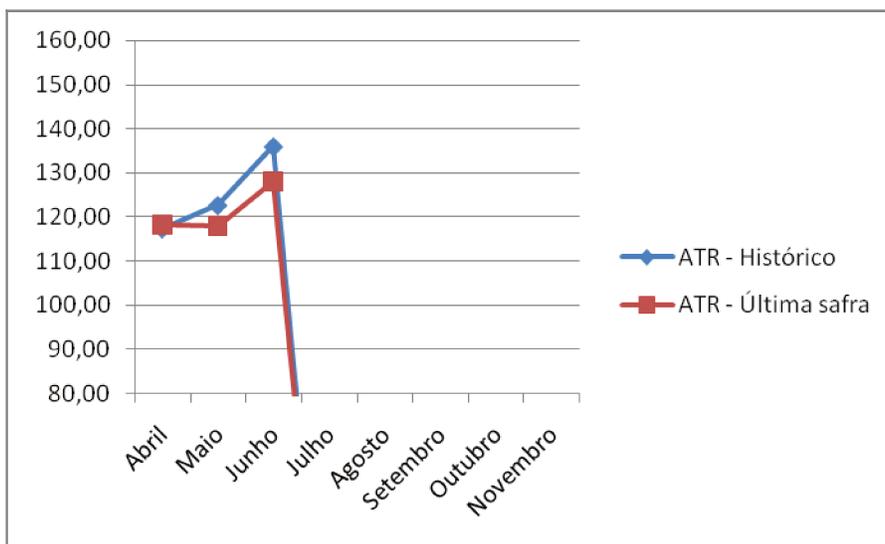


Figura 9: Rendimento Histórico e da última safra do grupo Precoce 1

- Grupo 2 – As variedades deste grupo são muito exigentes em relação ao solo onde são plantadas. Para apresentarem um bom rendimento precisam ser plantadas em um solo de alta fertilidade.

Variedades – RB85453
 RB925211
 RB966928
 CTC-13

Curva de Maturação teórica:

Mês	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	102,07	113,68	125,01	132,90	137,87	139,50	137,92	133,70
ATR - Última safra	107,21	116,30	123,66	128,78	139,88	143,16	112,58	116,33

Tabela 5: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 2

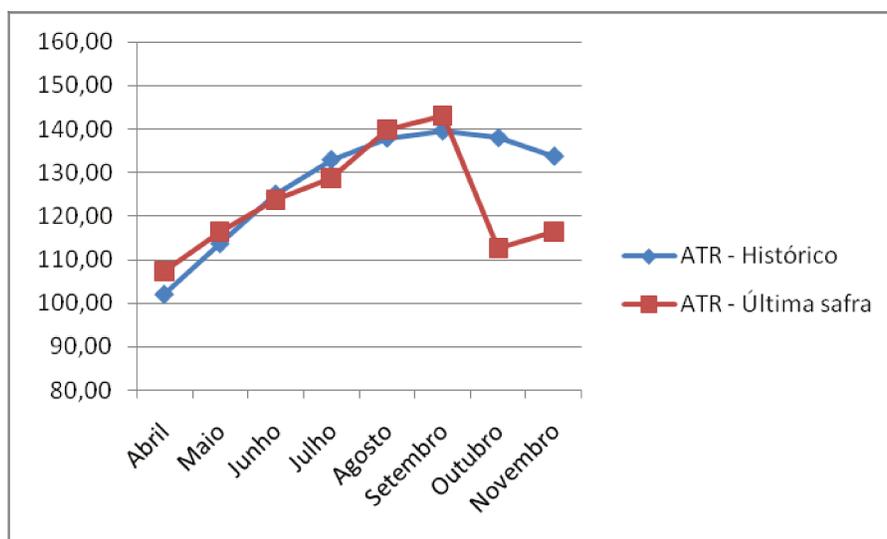


Figura 10: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 2

- Grupo 3 – As variedades deste grupo apresentam um manejo diferente das demais variedades precoces e apresenta uma curva de maturação diferente. Poderiam ser classificadas um tipo de variedade de classe precoce / média.

Variedades – SP89-1115
 SP91-1049

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	98,31	111,27	123,99	132,76	138,15	139,91	137,97	133,09
ATR - Última safra	113,72	115,78	121,57	133,38	139,11	143,13	140,63	134,16

Tabela 6: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 3

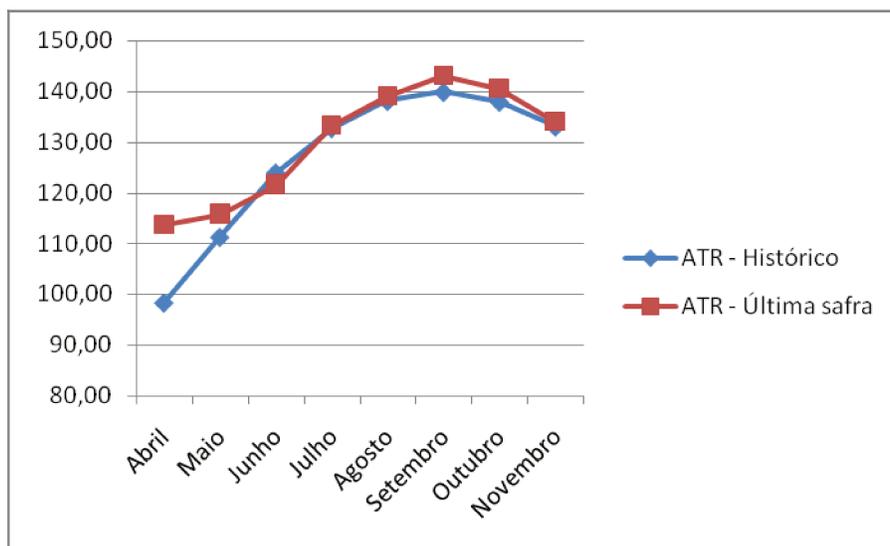


Figura 11: Rendimento histórico e da última safra do grupo Precoce 3

Variedades médias: São as variedades mais comuns, apresentam uma curva de maturação em que seu pico de performance acontece no inverno, são colhidas no meio da safra.

- Grupo 1 – As variedades deste grupo desenvolvem bem em solos de boa fertilidade. São variedades que são exigentes em solo.

Variedades –

- CT951425
- SP87365
- PO8862
- CTC-4
- SP80-1816
- SP81-3250
- SP80-3280

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	99,12	111,30	123,34	131,76	137,16	139,17	137,89	133,85
ATR - Última safra	98,50	108,56	117,17	128,89	130,36	132,45	136,14	130,89

Tabela 7: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 1

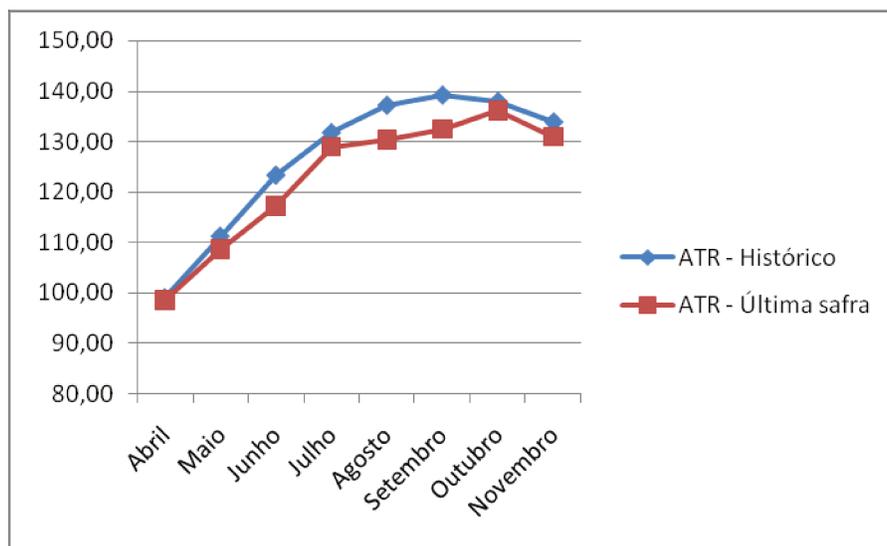


Figura 12: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 1

- Grupo 2 – As variedades deste grupo desenvolvem bem em solos intermediários, classe C e D. Não desenvolvem tão bem quanto o primeiro grupo em solos classe A e B, mas supera o primeiro grupo em solos C e D.

Variedades – CTC-11
 CTC-10
 RB855536
 RB855113

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	99,47	112,01	124,36	132,99	138,61	140,66	139,41	135,25
ATR - Última safra	118,12	112,85	114,42	127,47	135,75	140,68	142,49	131,05

Tabela 8: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 2

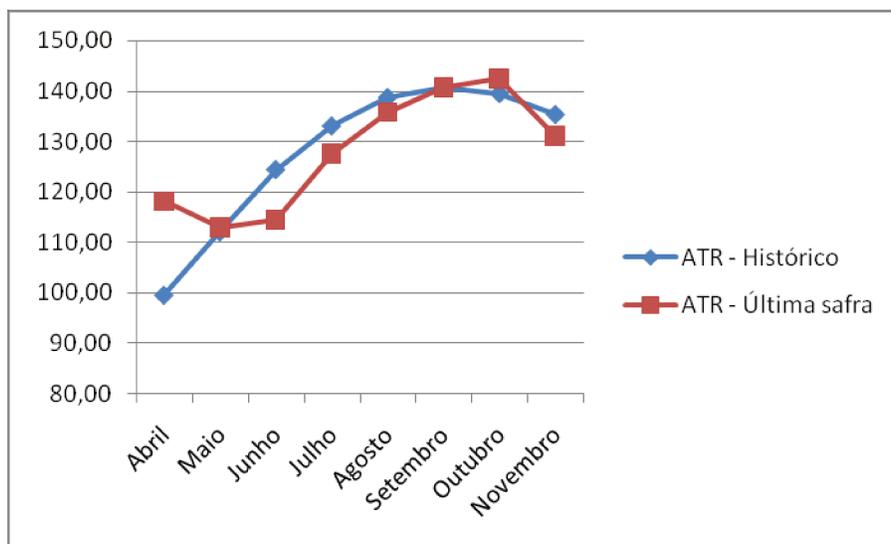


Figura 13: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 2

- Grupo 3 – As variedades deste grupo são ideais para solos com baixa fertilidade, ou seja, foram desenvolvidas para solos tido como arenosos.

Variedades – CTC-15
 CTC-2

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	100,08	112,33	124,40	132,76	138,05	139,82	138,24	133,79
ATR - Última safra	104,82	127,93	129,01	134,44	140,45	146,71	138,15	108,64

Tabela 9: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 3

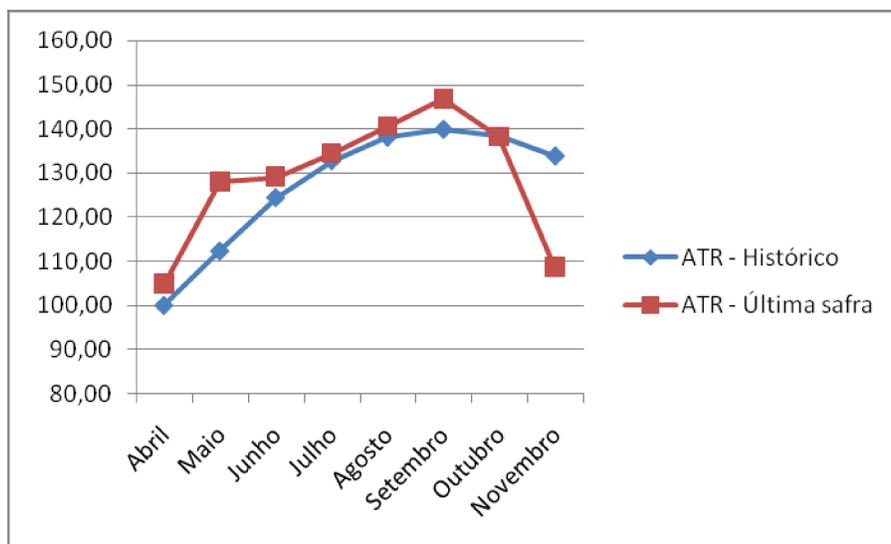


Figura 14: Rendimento histórico e da última safra do grupo Média 3

Variedades tardias – São variedades que apresentam uma maturação mais lenta e são ideais para serem colhidas no final da safra.

- Grupo 1 – É composto por duas variedades que apresentam um amadurecimento muito tardio, devem ser as últimas variedades a serem colhidas. Variedades ideais para solos de alta e média fertilidade.

Variedades – CTC-14
RB72454

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	98,87	111,45	123,89	132,53	138,05	140,05	138,71	134,39
ATR - Última safra	100,08	111,83	119,42	134,15	136,43	146,20	140,78	138,12

Tabela 10: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 1

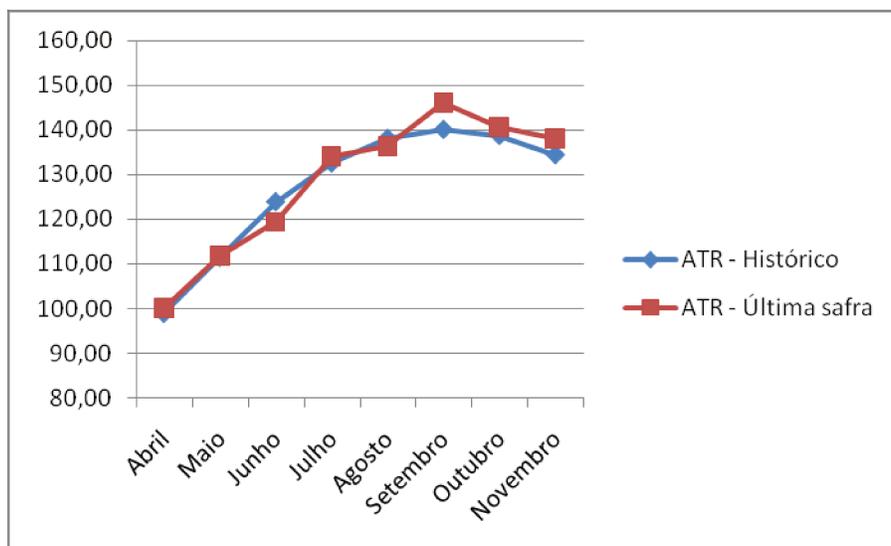


Figura 15: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 1

- Grupo 2 – É classificado como um grupo de variedades tardias embora apresente uma curva de maturação de média para tardia. O pico de maturação é anterior ao do primeiro grupo. Variedades desenvolvem bem em solos com média e alta fertilidade.

Variedades – CTC-6
 CTC-3
 SP90-1638
 SP90-3414

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	97,79	110,94	123,71	132,25	137,31	138,34	135,63	129,76
ATR - Última safra	124,20	112,31	119,33	136,04	130,78	144,98	141,21	133,09

Tabela 11: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 2

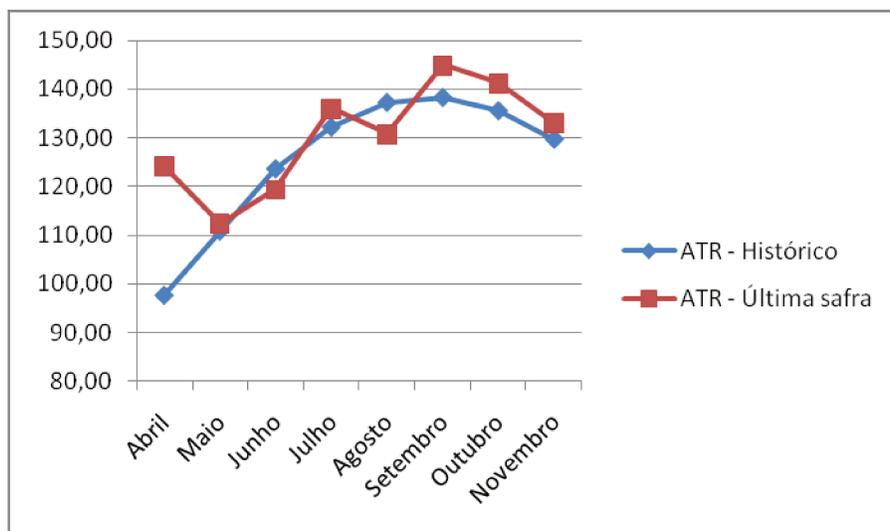


Figura 16: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 2

- Grupo 3 – Este grupo é composto por variedades que desenvolvem bem em solos com baixa fertilidade, ou seja, solos pobres em nutrientes e com características arenosas.

Variedades – SP832847
RB867515

Curva de maturação teórica:

Mês	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
ATR - Histórico	97,11	110,34	123,43	132,58	138,52	140,80	139,46	135,23
ATR - Última safra	104,77	116,69	119,57	134,78	139,38	144,48	146,43	130,22

Tabela 12: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 3

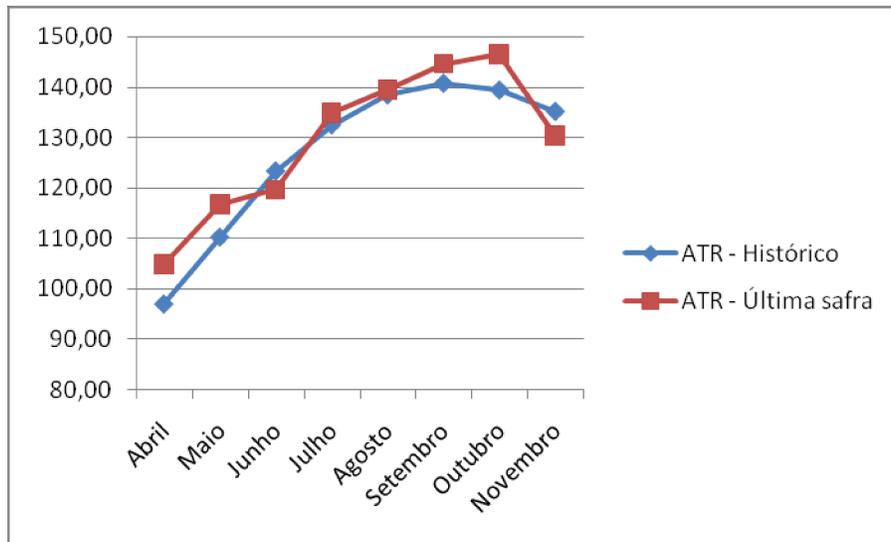


Figura 17: Rendimento histórico e da última safra do grupo Tardia 3

3.3. RESTRIÇÕES

Um modelo de programação linear é composto por uma função objetivo e restrições. As restrições do problema são os elementos que delimitam a solução do problema. As restrições que formarão o modelo e sua importância no contexto do problema serão descritas abaixo.

3.3.1. Capacidade de tempo disponível na usina

A capacidade mensal e anual da usina de acordo os dias de safra previstos.

A usina apresenta sistemas de informação que traz métricas de tempo que foram perdidos durante a safra. Estes tempos são divididos em três categorias que são: Agrícola, que seria devido a algum problema no campo, seja por manutenção ou problema no maquinário ou deslocamento de frentes de colheita de uma região pra outra; Indústria, que é o tempo que a indústria parou devido a alguma manutenção necessária ou quebra de algum equipamento; Clima, seria o tempo perdido quando está chovendo e a usina para por falta de cana.

Os valores mensais das restrições dos blocos de colheita parte deste estudo de aproveitamento de tempo. Todos os limites mensais de cada bloco de colheita fazem relação com este estudo demonstrado nesta tabela.

A capacidade disponível da usina será apresentada na tabela abaixo:

Aproveitamento de tempo - Usina Iracema

Safra 08/09

Meses		Agrícola	Indústria	Clima	Total	Capacidade disponível
ABR	%	8,26	0	52,83	61,09	38,91
MAI	%	0,13	5,52	17,65	23,3	76,7
JUN	%	0,03	3,33	15	18,36	81,64
JUL	%	0,69	3,93	0	4,62	95,38
AGO	%	0,71	4,83	16,85	22,39	77,61
SET	%	0,26	2,42	12,13	14,81	85,19
OUT	%	0,16	0,54	25,08	25,78	74,22
NOV	%	0,13	1,87	12,13	14,13	85,87
DEZ	%	0,56	4,35	19,61	24,52	75,48

Tabela 13: Aproveitamento de tempo da Usina Iracema safra 08/09

625	TONELADAS POR HORA
15000	TONELADAS POR DIA

MÊS	DIAS	RENDIMENTO	CAP. DISP.
ABRIL	30	38,91%	175095
MAIO	31	76,70%	356655
JUN	30	81,64%	367380
JUL	31	95,38%	443517
AGO	31	77,61%	360886,5
SET	30	85,19%	383355
OUT	31	74,22%	345123
NOV	30	85,87%	386415
Total			2818426,5

Tabela 14: Capacidade disponível mensal da usina

O mês de abril apresentou uma capacidade de rendimento baixa pois o início da safra ocorre no meio do mês.

3.3.2. Área de vinhaça Aspersão

Esta restrição contempla toda a área irrigada com vinhaça através do método da aspersão realizado por tubulações que levam a vinhaça utilizando a gravidade e bombeamento. A vinhaça é um subproduto da produção de etanol rico em potássio e é um importante fertilizante orgânico. Como a produção de etanol é um processo contínuo e a produção de vinhaça idem, esta precisa ser depositado em alguma área pois não existe nenhum local na usina onde possa ser estocado este subproduto. Para não sobrecarregar os caminhões que transportam vinhaça para as áreas do bloco Vinhaça Rodotrem, estas duas restrições precisam atuar em conjunto durante toda a safra, ou seja, precisam ter uma demanda constante de áreas nos dois locais.

Capacidade da área: 535.365 ton / safra (08/09)

3.3.3. Área de vinhaça Caminhão (Rodotrem)

A restrição chamada de vinhaça Caminhão seria toda a área que é irrigada com vinhaça e devido a distância da usina ou por algum outro fator que a impossibilite de receber vinhaça através do método da aspersão. Precisa ser colhida durante toda a safra de maneira planejada limitando a disponibilidade de caminhões que faz o transporte deste subproduto.

Capacidade da área: 328.384 ton / safra (08/09)

3.3.4. Área de águas residuárias (Boa Vista)

A área da Boa Vista é um local que não recebe vinhaça e precisa ser irrigada com água de forma contínua durante toda a safra. As águas residuárias do processo industrial têm saída contínua do processo, assim a região precisa receber esta água de forma contínua durante a safra. O transporte desta água é feito pelo método de aspersão através de tubulações e canais.

Capacidade da área: 207.565 ton / safra (08/09)

3.3.5. Área da Serra

A área da Serra é uma área distante da Usina que se localiza em uma região de relevo ondulado e de fertilidade baixa. Devido à distância, existe uma frente de colheita que trabalha somente na região da Serra, assim, existe a necessidade deste bloco ter uma colheita bem distribuída durante os meses de safra.

Capacidade da área: 435.903 ton / safra (08/09)

3.3.6. Área de Limeira

A área de Limeira é um bloco de colheita que necessita ser colhido de forma planejada durante a safra devido à distância e as restrições de transporte.

Capacidade da área: 174.255 ton / safra (08/09)

3.3.7. Área de Sequeiro

O bloco denominado sequeiro são as áreas que não são irrigadas e ficam próximas às cidades. Como muitas vezes ficam espalhadas em pequenas propriedades, necessitam de uma colheita constante em unidades deste grupo para conseguir entregar toda a cana na usina e se utilizar da quantidade de caminhões dimensionados para este processo.

Capacidade da área: 232.287 ton / safra (08/09)

3.4. DELIMITAÇÕES DO MODELO

Os modelos de programação linear foram desenvolvidos utilizando-se de algumas premissas e de alguns conceitos que foram explicados anteriormente e serão evidenciados neste capítulo. As delimitações do modelo foram divididos em três capítulos que são o balanço hídrico, valor de ATR nos blocos e logística dos blocos. No primeiro, será mostrado a importância do regime de chuvas no rendimento em ATR, no segundo será apresentado o conceito atrás do rendimento padrão em ATR das variedades nos blocos e o terceiro capítulo contemplará as posições geográficas dos blocos.

3.4.1. Balanço Hídrico

O indicador de performance agrícola é o ATR que seria a quantidade de açúcar presente em cada tonelada de cana. Este indicador reflete o nível de maturação em que se encontra a cana-de-açúcar. Quando o solo fica um período sem chuvas e a planta não consegue absorver mais água do solo, ela começa a consumir a água que fica retida. Este momento de déficit hídrico como é chamado, seria o momento ideal para fazer a colheita de cana pois a quantidade de açúcar presente é alta em relação ao peso do produto. Com o solo seco, as máquinas que fazem a colheita das áreas trabalham com um rendimento maior. A planta neste período apresenta seu melhor rendimento em termos de ATR / Ton.

O período de chuvas é um importante período do cultivo da cana-de-açúcar pois é o momento em que a cana se desenvolve e cresce. Embora de vital importância em determinado momento, a chuva tem um impacto ruim no momento da colheita. Em alguns casos ela inviabiliza a colheita e em outros ela diminui a produtividade da cana, pois o caule fica com uma concentração grande de água.

O gráfico a seguir mostra o balanço hídrico durante a safra no ano de 2008/2009:

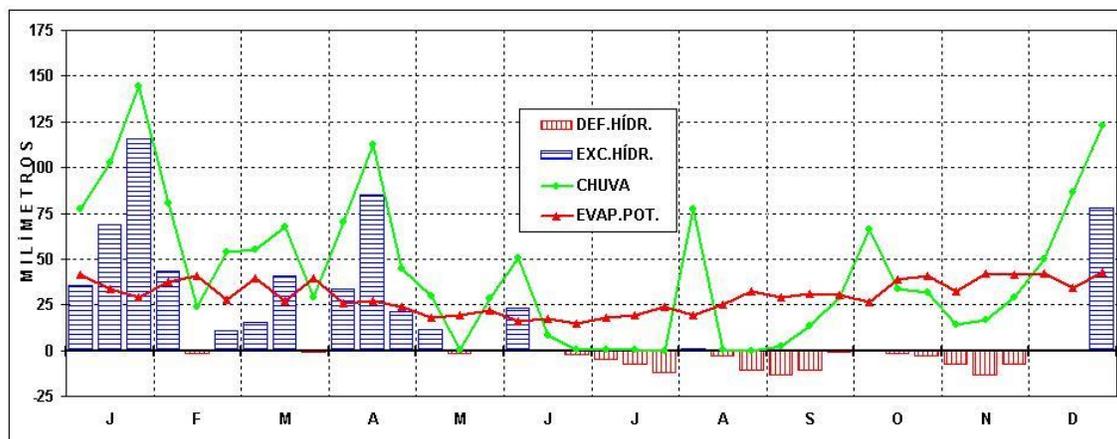


Figura 18: Balanço Hídrico da região de colheita da usina (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC)

A seguir veja o gráfico de ATR Semanal percebido durante a safra 2008/2009:

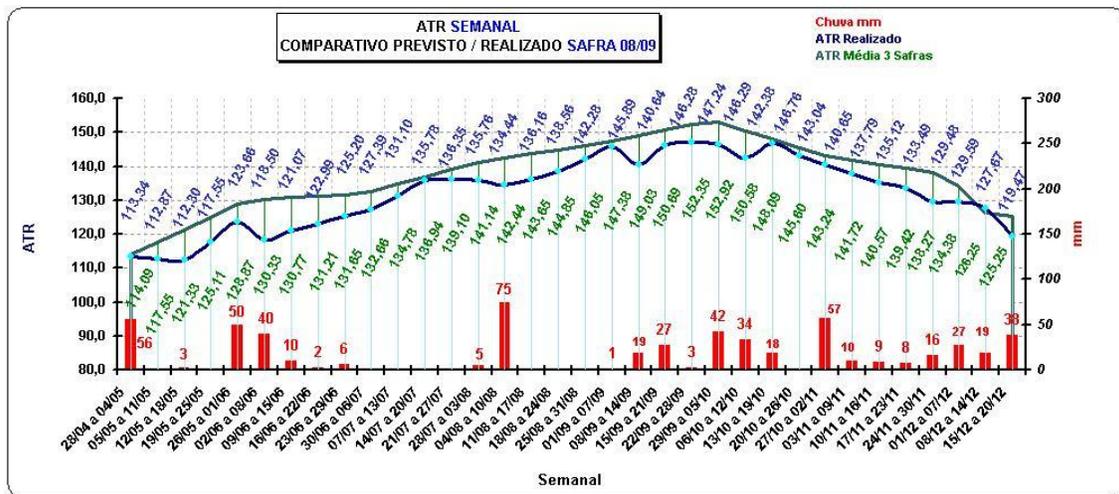


Figura 19: Comparativo Previsto x Realizado por índice de ATR (fonte: Dados fornecidos pela usina)

O nível de precipitações durante a safra foi muito alto e se compararmos o ATR obtido durante a safra e o ATR dos últimos 3 anos, é claramente perceptível a diferença de performance.

Segue abaixo o nível de precipitações dos últimos 3 anos: 2007, 2006, 2005, respectivamente.

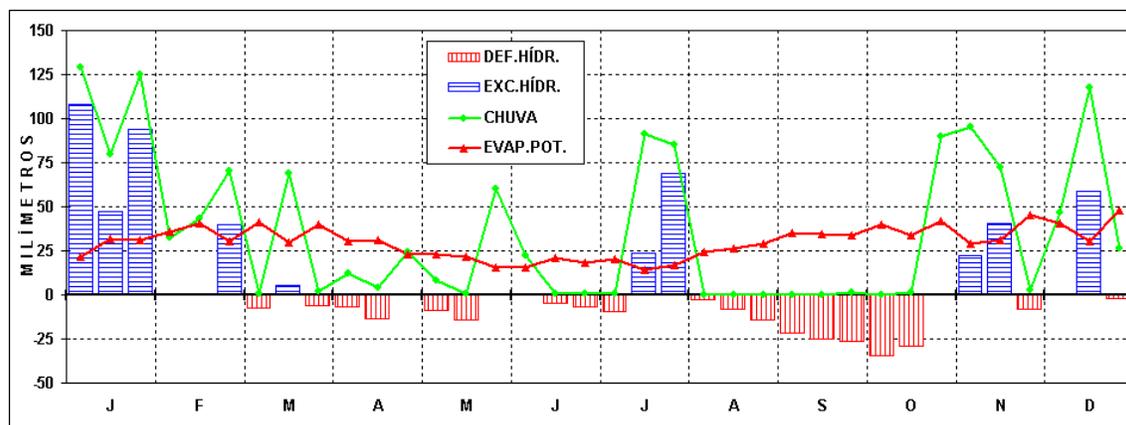


Figura 20: Balanço Hídrico da área de colheita da usina em 2007 (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC)

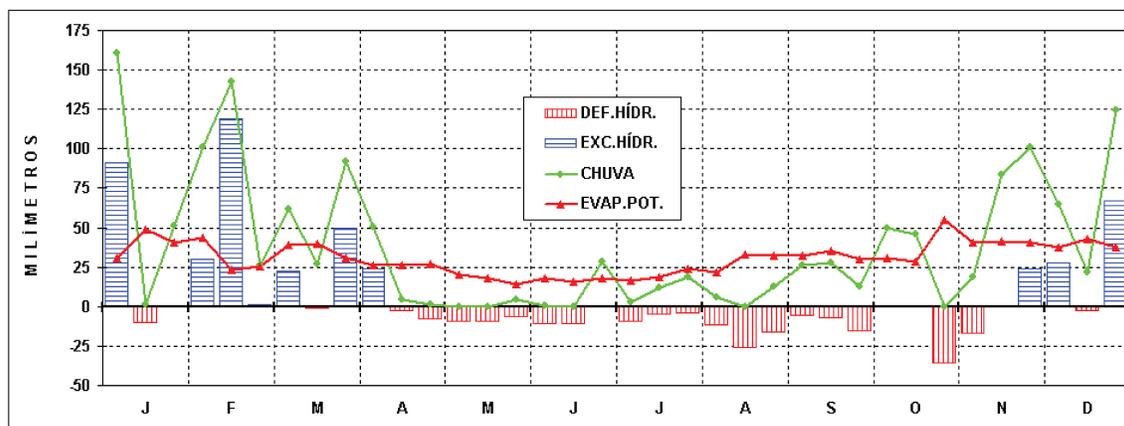


Figura 21: Balanço Hídrico da área de colheita da usina em 2008 (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC)

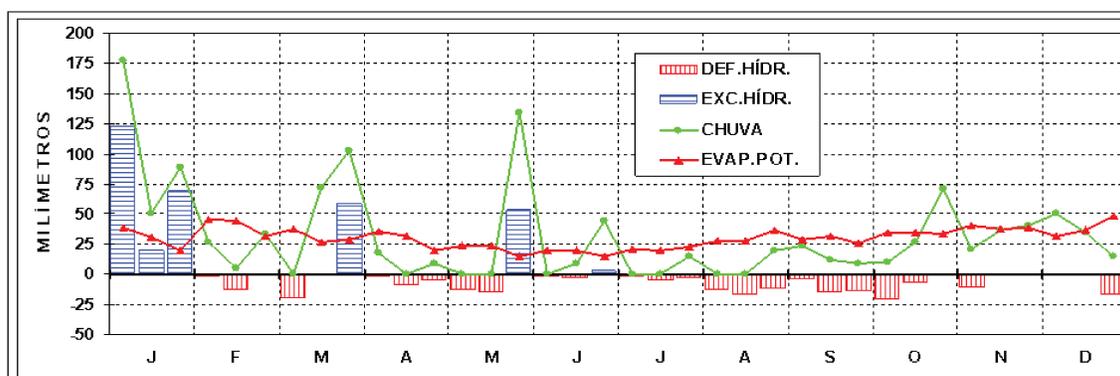


Figura 22: Balanço Hídrico da área de colheita da usina em 2009 (fonte: Dados disponibilizados pelo CTC)

O estudo de caso não contempla precipitações e balanço hídrico diretamente como suas restrições devido a imprevisibilidade.

3.4.2. Valor de ATR das variedades nos blocos

Para a construção dos modelos, foram considerados os valores de ATR padrão para as variedades independentemente dos blocos em que estavam inseridas. Segundo estudos feitos há muitos anos e que serão exemplificados abaixo, os valores de rendimento em ATR de uma determinada variedade é pouco influenciada pelo bloco em que se encontra. O que mais diferencia em termos de produtividade de um bloco para outro é a produção em toneladas.

Segue tabelas de rendimento em toneladas por hectare e outra tabela composta de pol por hectare em um estudo feito pelo CTC:

<i>Toneladas de Cana por Hectare (TCH)</i>							
<i>Ambientes de Produção</i>	<i>Estágio de Corte</i>					<i>Média 4cortes</i>	<i>Média 5cortes</i>
	<i>1º corte</i>	<i>2º corte</i>	<i>3º corte</i>	<i>4º corte</i>	<i>5º corte</i>		
A	133	105	94	88	80	105	100
B	128	102	90	83	77	101	96
C	121	98	85	77	79	95	92
D	114	91	81	75	79	90	88
E	105	85	74	66	65	83	79

Tabela 15: Produtividade de cana por Hectare

<i>Toneladas de Pol por Hectare (TPH)</i>							
<i>Ambientes de Produção</i>	<i>Estágio de Corte</i>					<i>Média 4cortes</i>	<i>Média 5cortes</i>
	<i>1º corte</i>	<i>2º corte</i>	<i>3º corte</i>	<i>4º corte</i>	<i>5º corte</i>		
A	18,8	14,9	13,3	12,5	11,3	14,9	14,2
B	18,1	14,5	12,8	11,8	10,9	14,3	13,6
C	17,1	13,9	12,0	10,9	11,2	13,5	13,0
D	16,2	12,9	11,5	10,6	11,2	12,8	12,5
E	14,9	12,0	10,5	9,4	9,2	11,7	11,2

Tabela 16: Produtividade de Pol por Hectare

A tabela 15 mostra o rendimento de cana por hectare, ou seja, quantidade de cana por hectare. A tabela 16 mostra o rendimento em Pol por hectare, Pol é uma medida que representa quantidade de açúcar por hectare. Para comprovar que o ATR das variedades é comum em relação aos ambientes em que estão plantadas, podemos analisar que o rendimento de Pol por hectare reduz de acordo com a quantidade de cana encontrada em cada hectare. A tabela 16 reflete o resultado da tabela 15, ou seja, a influência nos valores de Pol por hectare se deve aos resultados da produção em toneladas de cana.

3.4.3. Logística dos blocos

As restrições do modelo são os blocos de colheita que apresentam cada um com sua particularidade a forma de como deve ser colhida a cana. Cada bloco de colheita tem a sua restrição e o motivo de ter sido dividido desta forma. É importante lembrar que todos os blocos devem ser colhidos de forma homogênea e planejada para a distância média da usina ficar em torno de 23 km. A quantidade de caminhões disponíveis na usina é feito de acordo

com este número. Desta forma, além das particularidades pertencentes a cada bloco, deve levar-se em conta a colheita destes de forma uniforme para atender aos caminhões da usina.

3.5. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

O estudo foi dividido em três principais modelos que são:

- **Modelo de Apresentação:** O modelo de apresentação é um modelo resumido com as principais variedades da usina. O objetivo da construção deste modelo é mostrar como funciona um modelo de programação linear e a importância do mesmo no nosso estudo e na situação-problema que vamos estudar.
- **Modelos com base no histórico de colheita:** Estes modelos têm como objetivo analisar os dados utilizados pelo sistema que serve de suporte à decisão para a colheita de cana. Os modelos oferecem como resposta o pior cenário com as atuais restrições da operação, o melhor cenário e um cenário sem restrição individual para as variedades, que seria um planejamento para plantio e também o resultado máximo que o canavial pode oferecer.
- **Modelos com base de dados da última safra:** Estes modelos apresentam como seus índices de rendimento de ATR os dados da última safra que seria 08/09. O intuito dos modelos criados seria fazer uma análise semelhante aos modelos com base de dados histórica, porém uma análise posterior entre os dois tipos de modelos será feita.

3.5.1. Modelo de Apresentação

Neste modelo serão consideradas:

- Os dados de rendimento dos canaviais são os dados reais da safra de 2008/2009.
- O rendimento de cada variedade nos meses de safra são os dados gerais independentemente de onde estão localizadas as fazendas.
- Tem como finalidade utilizar dados reais de safra para exemplificar os benefícios da programação linear e de um bom planejamento de colheita.

Apresentação do modelo

No sentido de tornar o problema de dimensão possível de redução e manter uma representação adequada do sistema real serão consideradas somente as cinco maiores variedades cultivadas. Para estas são consideradas:

a) Na função objetivo:

- O valor do ATR mensal de cada variedade.

b) Nas restrições:

- Somatória mensal de toneladas das variedades
- Quantidade total de cada variedade na safra.

O cenário real que contempla as variedades e seus respectivos rendimentos de toneladas e ATR por mês está descrito na tabela abaixo:

RB867515	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS	37.005,00	37.302,00	9.713,00	37.029,00	15.253,00	18.887,00	14.436,00	2.610,00	172.235,00
ATR	121,80	125,80	133,60	141,90	151,10	158,80	145,00	131,40	138,68
TOTAL ATR	4507209	4692591,6	1297656,8	5254415,1	2304728,3	2999255,6	2093220	342954	23.492.030,40

Tabela 17: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade RB867515

RB855453	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS	59.771,00	50.554,00	28.184,00	21.925,00	865,00	5.051,00	901,00		167.251,00
ATR	123,00	127,30	130,10	138,60	151,40	154,80	136,20		137,34
TOTAL ATR	7351833	6435524,2	3666738,4	3038805	130961	781894,8	122716,2		21.528.472,60

Tabela 18: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade RB855453

SP80-1816	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS	10.344,00	23.055,00	8.424,00	6.502,00	12.396,00	29.105,00	33.712,00	2.104,00	125.642,00
ATR	116,60	126,10	135,60	131,10	157,20	152,70	140,10	136,90	137,04
TOTAL ATR	1206110	2907235,5	1142294,4	852412,2	1948651,2	4444333,5	4723051,2	288037,6	17.512.126,00

Tabela 19: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade SP80-1816

SP80-3280	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS	215,00	3.713,00	23.043,00	22.676,00	24.122,00	34.583,00	21.541,00	4.696,00	134.589,00
ATR	97,20	134,10	128,90	126,10	139,80	147,70	132,00	118,50	128,04
TOTAL ATR	20898	497913,3	2970242,7	2859443,6	3372255,6	5107909,1	2843412	556476	18.228.550,30

Tabela 20: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade SP80-3280

SP83-2847	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS	25.975,00	52.581,00	46.105,00	48.642,00	42.370,00	18.417,00	39.624,00	45.119,00	318.833,00
ATR	111,60	125,60	133,50	134,80	149,00	151,40	128,80	123,30	132,25
TOTAL ATR	2898810	6604173,6	6155017,5	6556941,6	6313130	2788333,8	5103571,2	5563173	41.983.150,40

Tabela 21: Rendimento ATR mensal e quantidade colhida da variedade SP83-2847

Somatória das toneladas por mês e ATR médio:

TON / MÊS	133.310,00	167.205,00	115.469,00	136.774,00	95.006,00	106.043,00	110.214,00	54.529,00
ATR MÉDIO	119,91	126,42	131,91	135,71	148,09	152,03	135,06	123,80

Tabela 22: Resultado da somatória mensal de quantidade de cana colhida e ATR médio

Função Objetivo para o modelo apresentação

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{rb7515,m4}, ATR_{rb7515,m5}, \dots, ATR_{x,y}) \quad (3.6)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Variedades:

- RB867515 (rb7515)
- RB855453 (rb5453)
- SP80-1816 (SP1816)
- SP80-3280 (SP3280)
- SP83-2847 (SP2847)

y – Mês de colheita

Abril (m4), Maio (m5), Junho (m6), Julho (m7), ... , Dezembro (m12)

Restrições do modelo apresentação

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Produção mensal:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} ATR_{x,y} MES_{x,y} \leq MEST_y \quad (3.7)$$

Onde:

X – Capacidade total das variedades

Y – Quantidade total de meses de colheita

$ATR_{x,y}$ – Rendimento em ATR da variedade x no mês y

$MES_{x,y}$ – Produção mensal (y) de cada variedade (x)

$MEST_y$ – Produção total necessária por mês (y)

- Capacidade total de cada variedade:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} ATR_{x,y} VAR_{x,y} \leq VART_x \quad (3.8)$$

Onde:

X – Capacidade total das variedades

Y – Quantidade total de meses de colheita

$ATR_{x,y}$ – Rendimento em ATR da variedade x no mês y

$VAR_{x,y}$ – Produção mensal (y) de cada variedade (x)

$VART_x$ – Produção total de cada variedade (x)

3.5.2. Modelos com base em histórico de colheita

O sistema que faz a coleta dos dados de toda a cana-de-açúcar que entra na usina abastece o programa de otimização de colheita que serve de suporte para a equipe agrícola da usina. A base de dados que dá suporte a este programa será a mesma utilizada nestes modelos. A formação da curva de maturação de uma determinada variedade é o resultado de todos os anos de colheita desta mesma variedade. Ou seja, os coeficientes da função

objetivo que são os rendimentos mensais das variedades são os resultados de muitos anos de colheita. O impacto por utilizar estes índices e a comparação entre que é previsto e o que aconteceu realmente será discutido no capítulo de apresentação de resultados e discussões.

O primeiro modelo tem como objetivo mostrar o pior rendimento da usina, ou seja, seria a distribuição da colheita da pior forma possível, cortando toda a área de cana plantada. O segundo modelo foi desenvolvido para mostrar o rendimento máximo do canavial atendendo às restrições de quantidade total de cana por variedade e a restrição de quantidade mensal exigida pelos blocos. O terceiro modelo tem como objetivo apresentar o rendimento máximo do canavial independente da quantidade restrita de cada variedade. O modelo apresenta como restrição a quantidade total de cana e o modelo quantifica as variedades para o melhor rendimento possível. O modelo tem como objetivo apresentar um resultado que possa servir como um planejamento de plantio para próximas safras.

Segue abaixo os rendimentos de cada variedade para estes modelos:

		Meses de safra							
		<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>
ATR (Grupo Variedade)	<i>Precoce - Grupo 1</i>	117,31	122,63	136,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Precoce - Grupo 2</i>	102,07	113,68	125,01	132,90	137,87	139,50	137,92	133,70
	<i>Precoce - Grupo 3</i>	98,31	111,27	123,99	132,76	138,15	139,91	137,97	133,09
	<i>Média - Grupo 1</i>	99,12	111,30	123,34	131,76	137,16	139,17	137,89	133,85
	<i>Média - Grupo 2</i>	99,47	112,01	124,36	132,99	138,61	140,66	139,41	135,25
	<i>Média - Grupo 3</i>	100,08	112,33	124,40	132,76	138,05	139,82	138,24	133,79
	<i>Tardia - Grupo 1</i>	98,87	111,45	123,89	132,53	138,05	140,05	138,71	134,39
	<i>Tardia - Grupo 2</i>	97,79	110,94	123,71	132,25	137,31	138,34	135,63	129,76
	<i>Tardia - Grupo 3</i>	97,11	110,34	123,43	132,58	138,52	140,80	139,46	135,23

Tabela 23: Rendimento histórico de ATR mensal dos grupos de variedades

O gráfico gerado a partir da tabela acima é apresentado na figura abaixo:

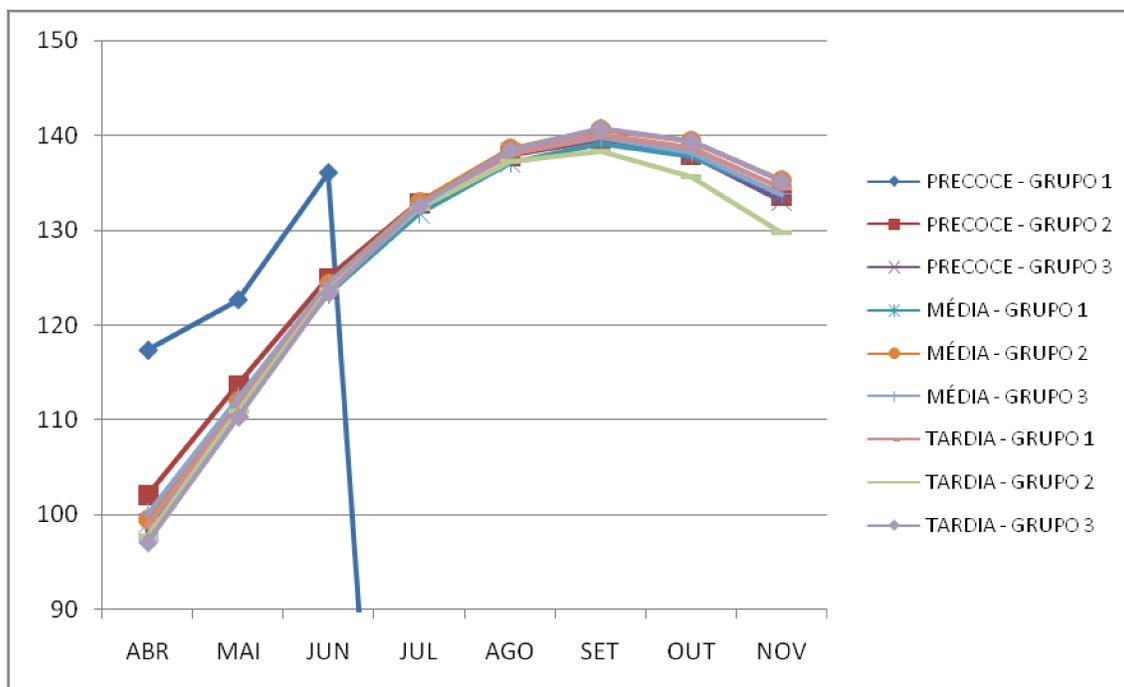


Figura 23: Gráfico de rendimento do ATR histórico mensal dos grupos de variedade

A tabela abaixo mostra a quantidade de cana que deve ser colhida em cada mês de safra por bloco de colheita para que as restrições dos blocos sejam atendidas:

		Produção por mês (ton)								TOTAL
		ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	
Produção por bloco (ton)	ASPERSÃO	26713,79	54413,93	56050,21	67666,24	55059,51	58487,48	52654,52	58954,33	430000
	BOA VISTA	10685,52	21765,57	22420,08	27066,49	22023,81	23394,99	21061,81	23581,73	172000
	LIMEIRA	10312,76	21006,31	21637,99	26122,31	21255,53	22578,89	20327,09	22759,11	166000
	RODOTREM	17705,65	36065,04	37149,56	44848,55	36492,93	38764,95	34898,92	39074,38	285000
	SEQUEIRO	13667,52	27839,68	28676,85	34619,93	28169,98	29923,82	26939,52	30162,68	220000
	SERRA	26403,16	53781,21	55398,46	66879,42	54419,29	57807,39	52042,26	58268,82	425000
	TOTAL	105488,40	214871,73	221333,16	267202,95	217421,06	230957,52	207924,12	232801,06	1698000

Tabela 24: Quantidade de cana mensal disponível em cada bloco de colheita

Cada bloco de colheita apresenta uma diferente configuração quanto às variedades plantadas em seu canavial. Abaixo, seguem as respectivas quantidades em cada bloco de colheita:

Área de vinhaça por aspensão

- Precoce – Grupo 1: 5.199 ton
- Precoce – Grupo 2: 73.359 ton
- Precoce – Grupo 3: 170.102 ton
- Média – Grupo 1: 106.353 ton
- Média – Grupo 2: 6.483 ton
- Tardia – Grupo 1: 9.091 ton
- Tardia – Grupo 2: 35.420 ton
- Tardia – Grupo 3: 14.793 ton

Área de vinhaça por caminhão

- Precoce – Grupo 1: 427 ton
- Precoce – Grupo 2: 16.984 ton
- Precoce – Grupo 3: 116.321 ton
- Média – Grupo 1: 65.299 ton
- Média – Grupo 2: 37.349 ton
- Tardia – Grupo 1: 3.224 ton
- Tardia – Grupo 2: 10.567 ton
- Tardia – Grupo 3: 30.619 ton

Área da Boa Vista

- Precoce – Grupo 2: 45.176 ton
- Precoce – Grupo 3: 99.901 ton
- Média – Grupo 1: 15.444 ton
- Tardia – Grupo 2: 7.365 ton

Área da Serra

- Precoce – Grupo 2: 4.968 ton
- Precoce – Grupo 3: 1.445 ton
- Média – Grupo 1: 3.764 ton

- Média – Grupo 2: 22.957 ton
- Média – Grupo 3: 482 ton
- Tardia – Grupo 1: 10.541 ton
- Tardia – Grupo 2: 5.323 ton
- Tardia – Grupo 3: 365.430 ton

Área de Limeira

- Precoce – Grupo 3: 23.974 ton
- Média – Grupo 1: 5.977 ton
- Média – Grupo 2: 7.828 ton
- Média – Grupo 3: 5.657 ton
- Tardia – Grupo 2: 6.870 ton
- Tardia – Grupo 3: 111.763 ton

Área de sequeiro

- Precoce – Grupo 2: 10.414 ton
- Precoce – Grupo 3: 84.903 ton
- Média – Grupo 1: 22.449 ton
- Média – Grupo 2: 12.870 ton
- Tardia – Grupo 1: 2.452 ton
- Tardia – Grupo 2: 36.634 ton
- Tardia – Grupo 3: 45.287 ton

O modelo configura-se da seguinte forma: os índices de ATR mensal de cada grupo de variedade são os coeficientes da função objetivo. A quantidade necessária de colheita mensal de cada bloco, a quantidade total de cana de cada grupo de variedade e a capacidade de moagem da usina são as restrições.

Modelo 01

Neste modelo:

Os dados de rendimento de todas as variedades consideradas são os dados históricos das variedades, ou seja, é o resultado de vários anos de safra, de todos os anos em que a variedade foi colhida. É a base de dados do sistema otimizador de planejamento de colheita utilizado na empresa.

Todos os blocos de colheita são tratados de maneira independente sendo que todos precisam ser colhidos de acordo com o rendimento da usina. A proporção mensal de cana retirada varia de acordo com os números de aproveitamento de tempo proveniente da usina. Ver tabela de capacidade mensal disponível na usina. Os blocos de colheita precisam obedecer às restrições mensais de colheita pré-determinadas.

Este modelo tem como objetivo alcançar o pior cenário possível em relação a rendimento de ATR colhendo toda a cana disponível.

Função Objetivo para o modelo 01

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{m1,asp,4}, ATR_{m1,asp,5}, \dots, ATR_{x,y,z}) \quad (3.9)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Grupo variedades precoces – Precoce 1 (p1), Precoce 2 (p2), Precoce 3 (p3).

Grupo variedades médias – Média 1 (m1), Média 2 (m2), Média 3 (m3).

Grupo variedades tardias – Tardia 1 (t1), Tardia 2 (t2), Tardia 3 (t3).

y – Bloco de colheita

Aspersão – (asp)

Boa Vista – (bv)

Rodotrem – (rod)

Limeira – (lim)

Serra – (ser)

Sequeiro – (seq)

z – Mês de colheita

Abril (4), Maio (5), Junho (6), Julho (7), ... , Dezembro (12)

Restrições do modelo 01

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Capacidade mensal dos blocos:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} BLO_{x,y,z} = BLOT_y \quad (3.10)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$BLO_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$BLOT_y$ – Capacidade mensal (y) de cada bloco de colheita

Modelo 02

O modelo representa:

Os dados de rendimento são os dados históricos das variedades que representam todos os anos de colheita de determinada variedade.

Os blocos de colheita são tratados de maneira independente, atrelados ao rendimento da usina. Os blocos de colheita precisam obedecer às restrições mensais de colheita pré-determinadas. As restrições mensais dos blocos são proporcionais à tabela de capacidade mensal disponível na usina.

Tem como objetivo determinar o mix de variedades a ser colhido para que apresente um rendimento ótimo.

Função Objetivo para o modelo 02

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{m1,asp,4}, ATR_{m1,asp,5}, \dots, ATR_{x,y,z}) \quad (3.11)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Grupo variedades precoces – Precoce 1 (p1), Precoce 2 (p2), Precoce 3 (p3).

Grupo variedades médias – Média 1 (m1), Média 2 (m2), Média 3 (m3).

Grupo variedades tardias – Tardia 1 (t1), Tardia 2 (t2), Tardia 3 (t3).

y – Bloco de colheita

Aspersão – (asp)

Boa Vista – (bv)

Rodotrem – (rod)

Limeira – (lim)

Serra – (ser)

Sequeiro – (seq)

z – Mês de colheita

Abril (4), Maio (5), Junho (6), Julho (7), ... , Dezembro (12)

Restrições do modelo 02

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Produção total do grupo de variedades por bloco de colheita:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} VAR_{x,y,z} \leq VART_{x,y} \quad (3.12)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$VAR_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$VART_{x,y}$ – Capacidade total de cada grupo de variedade (x) por bloco de colheita (y) (ton)

- Capacidade mensal dos blocos:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} BLO_{x,y,z} \leq BLOT_y \quad (3.13)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$BLO_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$BLOT_y$ – Capacidade mensal (y) de cada bloco de colheita

- Restrição da capacidade mensal da usina:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} MES_{x,y,z} \leq MEST_{y,z} \quad (3.14)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$MES_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$MEST_{y,z}$ – Capacidade total dos blocos de colheita (y), por mês de safra (z).

Modelo 03

Neste modelo é considerado:

Os blocos de colheita são tratados de forma independente, mas dependentes do rendimento da usina. De acordo com a produção, apresentam índices de colheita pré-determinados.

Cada bloco de colheita tem capacidade produtiva infinita, pois o modelo tem como intenção mostrar o rendimento máximo do canavial independente da variedade colhida. O modelo foi construído como orientador para o planejamento de plantio, pois uma vez que

todas as variedades estavam disponíveis, o modelo escolhe a variedade na proporção ideal para o máximo rendimento.

Tem como objetivo identificar qual o mix ideal de variedades para cada bloco.

Função Objetivo para o modelo 03

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{m1,asp,4}, ATR_{m1,asp,5}, \dots, ATR_{x,y,z}) \quad (3.15)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Grupo variedades precoces – Precoce 1 (p1), Precoce 2 (p2), Precoce 3 (p3).

Grupo variedades médias – Média 1 (m1), Média 2 (m2), Média 3 (m3).

Grupo variedades tardias – Tardia 1 (t1), Tardia 2 (t2), Tardia 3 (t3).

y – Bloco de colheita

Aspersão – (asp)

Boa Vista – (bv)

Rodotrem – (rod)

Limeira – (lim)

Serra – (ser)

Sequeiro – (seq)

z – Mês de colheita

Abril (4), Maio (5), Junho (6), Julho (7), ... , Dezembro (12)

Restrições do modelo 03

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Capacidade mensal dos blocos:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} BLO_{x,y,z} \leq BLOT_y \quad (3.16)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$BLO_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$BLOT_y$ – Capacidade mensal (y) de cada bloco de colheita

- Restrição da capacidade mensal da usina:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} MES_{x,y,z} \leq MEST_{y,z} \quad (3.17)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$MES_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$MEST_{y,z}$ – Capacidade total dos blocos de colheita (y), por mês de safra (z).

3.5.3. Modelos com base de dados da última safra

Os índices de rendimento ATR das variedades considerado foi o ocorrido na última safra. O sistema que faz a coleta de dados na entrada de cana da usina fornece todas as quantidades de cana processada e o índice de maturação em que ela entrou no processo. Os índices de rendimento são os coeficientes da função objetivo que será otimizada.

Seguindo a ordem anterior dos modelos construídos, o primeiro modelo tem como objetivo mostrar o pior rendimento da usina, ou seja, seria a distribuição da colheita da pior forma possível com toda a área do canavial colhida. O segundo modelo foi desenvolvido para mostrar o rendimento máximo do canavial atendendo às restrições de quantidade total de cana por variedade e a restrição de quantidade mensal exigida pelos blocos. O terceiro modelo tem como objetivo apresentar o rendimento máximo do canavial atendendo somente a restrição dos blocos. A quantidade disponível por variedade é infinita a fim de que o modelo busque encontrar o melhor mix de variedades por cada bloco que seria um planejamento do plantio que ocorreria posteriormente.

Segue abaixo o rendimento de cada grupo de variedade:

		Meses de safra							
		<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>
ATR (Grupo Variedade)	<i>Precoce - Grupo 1</i>	118,19	117,91	127,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Precoce - Grupo 2</i>	107,21	116,30	123,66	128,78	139,88	143,16	112,58	116,33
	<i>Precoce - Grupo 3</i>	113,72	115,78	121,57	133,38	139,11	143,13	140,63	134,16
	<i>Média - Grupo 1</i>	98,50	108,56	117,17	128,89	130,36	132,45	136,14	130,89
	<i>Média - Grupo 2</i>	118,12	112,85	114,42	127,47	135,75	140,68	142,49	131,05
	<i>Média - Grupo 3</i>	104,82	127,93	129,01	134,44	140,45	146,71	138,15	108,64
	<i>Tardia - Grupo 1</i>	100,08	111,83	119,42	134,15	136,43	146,20	140,78	138,12
	<i>Tardia - Grupo 2</i>	124,20	112,31	119,33	136,04	130,78	144,98	141,21	133,09
	<i>Tardia - Grupo 3</i>	104,77	116,69	119,57	134,78	139,38	144,48	146,43	130,22

Tabela 25: Rendimento mensal em ATR das variedades na safra 08/09.

A partir da tabela, abaixo segue o gráfico que representa todas as variedades:

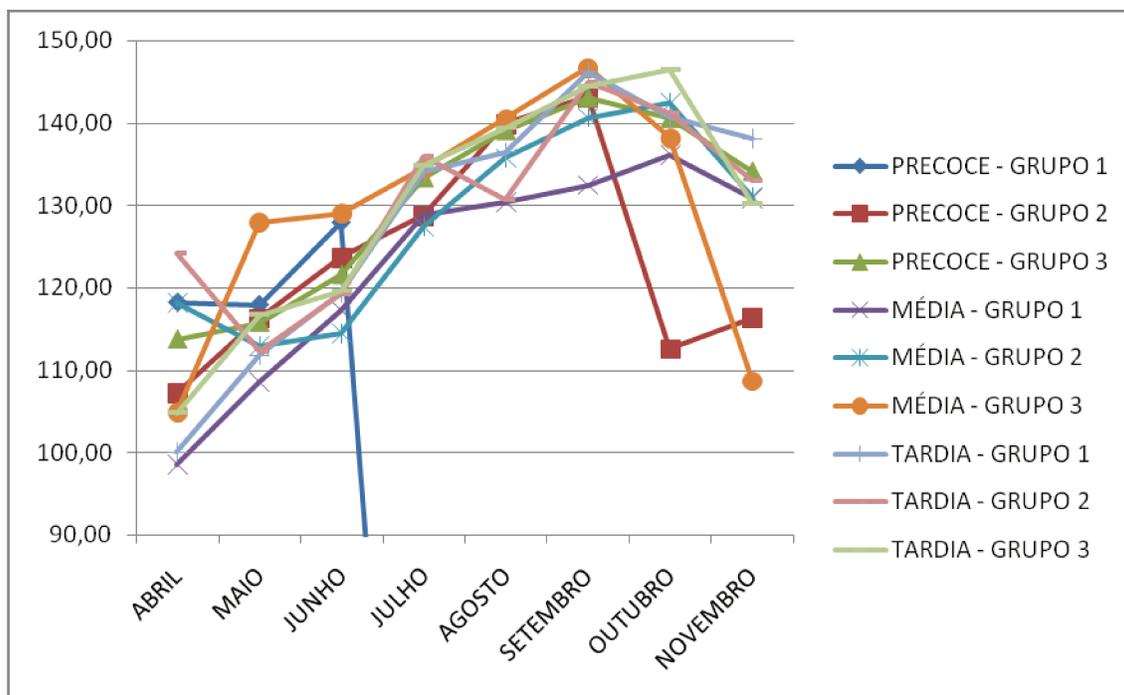


Figura 24: Rendimento mensal em ATR das variedades na safra 08/09.

A tabela abaixo mostra a quantidade de cana que deve ser colhida mensalmente por bloco de colheita para atender às restrições dos blocos:

		Produção por mês (ton)								TOTAL
		ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	
Produção por bloco (ton)	ASPERSÃO	26713,79	54413,93	56050,21	67666,24	55059,51	58487,48	52654,52	58954,33	430000
	BOA VISTA	10685,52	21765,57	22420,08	27066,49	22023,81	23394,99	21061,81	23581,73	172000
	LIMEIRA	10312,76	21006,31	21637,99	26122,31	21255,53	22578,89	20327,09	22759,11	166000
	RODOTREM	17705,65	36065,04	37149,56	44848,55	36492,93	38764,95	34898,92	39074,38	285000
	SEQUEIRO	13667,52	27839,68	28676,85	34619,93	28169,98	29923,82	26939,52	30162,68	220000
	SERRA	26403,16	53781,21	55398,46	66879,42	54419,29	57807,39	52042,26	58268,82	425000
	TOTAL	105488,40	214871,73	221333,16	267202,95	217421,06	230957,52	207924,12	232801,06	1698000

Tabela 26: Quantidade de cana mensal disponível para ser colhida

A configuração dos blocos de colheita é única. Abaixo, seguem os blocos e as respectivas quantidades de cada grupo de variedade:

Área de vinhaça por aspensão

- Precoce – Grupo 1: 5.199 ton

- Precoce – Grupo 2: 73.359 ton
- Precoce – Grupo 3: 170.102 ton
- Média – Grupo 1: 106.353 ton
- Média – Grupo 2: 6.483 ton
- Tardia – Grupo 1: 9.091 ton
- Tardia – Grupo 2: 35.420 ton
- Tardia – Grupo 3: 14.793 ton

Área de vinhaça por caminhão

- Precoce – Grupo 1: 427 ton
- Precoce – Grupo 2: 16.984 ton
- Precoce – Grupo 3: 116.321 ton
- Média – Grupo 1: 65.299 ton
- Média – Grupo 2: 37.349 ton
- Tardia – Grupo 1: 3.224 ton
- Tardia – Grupo 2: 10.567 ton
- Tardia – Grupo 3: 30.619 ton

Área da Boa Vista

- Precoce – Grupo 2: 45.176 ton
- Precoce – Grupo 3: 99.901 ton
- Média – Grupo 1: 15.444 ton
- Tardia – Grupo 2: 7.365 ton

Área da Serra

- Precoce – Grupo 2: 4.968 ton
- Precoce – Grupo 3: 1.445 ton
- Média – Grupo 1: 3.764 ton
- Média – Grupo 2: 22.957 ton

- Média – Grupo 3: 482 ton
- Tardia – Grupo 1: 10.541 ton
- Tardia – Grupo 2: 5.323 ton
- Tardia – Grupo 3: 365.430 ton

Área de Limeira

- Precoce – Grupo 3: 23.974 ton
- Média – Grupo 1: 5.977 ton
- Média – Grupo 2: 7.828 ton
- Média – Grupo 3: 5.657 ton
- Tardia – Grupo 2: 6.870 ton
- Tardia – Grupo 3: 111.763 ton

Área de sequeiro

- Precoce – Grupo 2: 10.414 ton
- Precoce – Grupo 3: 84.903 ton
- Média – Grupo 1: 22.449 ton
- Média – Grupo 2: 12.870 ton
- Tardia – Grupo 1: 2.452 ton
- Tardia – Grupo 2: 36.634 ton
- Tardia – Grupo 3: 45.287 ton

O modelo configura-se da seguinte forma: os índices de ATR mensal de cada grupo de variedade são os coeficientes da função objetivo. A quantidade necessária de colheita dos blocos, restrição da capacidade da usina e quantidade de cana por variedade são as restrições.

Modelo 01

Neste modelo serão consideradas:

Os dados de rendimento de todas as variedades consideradas são os dados da última safra. Os índices de ATR utilizados são os índices reais da safra 08/09.

Os blocos de colheita são tratados de maneira independente entre si, sendo que todos precisam ser colhidos de acordo com a necessidade da usina. A proporção mensal de como a cana precisa ser retirada varia de acordo com os número de aproveitamento de tempo proveniente da usina. Os blocos de colheita precisam obedecer às restrições mensais de colheita pré-determinadas.

O objetivo do modelo é apresentar o pior roteiro de colheita desde que todas as áreas sejam colhidas.

Função Objetivo para o modelo 01

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{m1,asp,4}, ATR_{m1,asp,5}, \dots, ATR_{x,y,z}) \quad (3.18)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Grupo variedades precoces – Precoce 1 (p1), Precoce 2 (p2), Precoce 3 (p3).

Grupo variedades médias – Média 1 (m1), Média 2 (m2), Média 3 (m3).

Grupo variedades tardias – Tardia 1 (t1), Tardia 2 (t2), Tardia 3 (t3).

y – Bloco de colheita

Aspersão – (asp)

Boa Vista – (bv)

Rodotrem – (rod)

Limeira – (lim)

Serra – (ser)

Sequeiro – (seq)

z – Mês de colheita

Abril (4), Maio (5), Junho (6), Julho (7), ... , Dezembro (12)

Restrições do modelo 01

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Capacidade mensal dos blocos:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} BLO_{x,y,z} = BLOT_y \quad (3.19)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$BLO_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$BLOT_y$ – Capacidade mensal (y) de cada bloco de colheita

Modelo 02

Neste modelo serão consideradas:

Os dados de rendimento são os dados reais da safra 08/09.

Os blocos de colheita são tratados de maneira independente, embora proporcionalmente colhidos de acordo com o rendimento da usina. Os blocos de colheita precisam obedecer às restrições mensais de colheita pré-determinadas.

O modelo tem como objetivo traçar um roteiro de como as variedades devem ser colhidas para que apresentem um rendimento ótimo, obedecendo às restrições de quantidade total de cana por grupo de variedade e quantidade mensal colhida por bloco.

Função Objetivo para o modelo 02

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{m1,asp,4}, ATR_{m1,asp,5}, \dots, ATR_{x,y,z}) \quad (3.20)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Grupo variedades precoces – Precoce 1 (p1), Precoce 2 (p2), Precoce 3 (p3).

Grupo variedades médias – Média 1 (m1), Média 2 (m2), Média 3 (m3).

Grupo variedades tardias – Tardia 1 (t1), Tardia 2 (t2), Tardia 3 (t3).

y – Bloco de colheita

Aspersão – (asp)

Boa Vista – (bv)

Rodotrem – (rod)

Limeira – (lim)

Serra – (ser)

Sequeiro – (seq)

z – Mês de colheita

Abril (4), Maio (5), Junho (6), Julho (7), ... , Dezembro (12)

Restrições do modelo 02

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Produção total do grupo de variedades por bloco de colheita:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} VAR_{x,y,z} \leq VART_{x,y} \quad (3.21)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$VAR_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$VART_{x,y}$ – Capacidade total de cada grupo de variedade (x) por bloco de colheita (y) (ton)

- Capacidade mensal dos blocos:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} BLO_{x,y,z} \leq BLOT_y \quad (3.22)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$BLO_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$BLOT_y$ – Capacidade mensal (y) de cada bloco de colheita

- Restrição da capacidade mensal da usina:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} MES_{x,y,z} \leq MEST_{y,z} \quad (3.23)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$MES_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$MEST_{y,z}$ – Capacidade total dos blocos de colheita (y), por mês de safra (z).

Modelo 03

Neste modelo serão consideradas:

Os blocos de colheita apresentam índices de colheita mensais pré-determinados que são relacionados à produção da usina. Os blocos são independentes entre si e apresentam a mesma relação de produtividade mensal pois os índices estão relacionados à usina.

O modelo tem como objetivo apresentar o rendimento máximo do canalial atendendo somente a restrição dos blocos. A quantidade disponível de cada variedade é infinita e o modelo escolhe quais variedades deve colher em determinado mês. O modelo tem como objetivo apresentar um resultado que possa servir como um planejamento de plantio para próximas safras.

Função Objetivo para o modelo 03

$$ATR(\text{total}) = f(ATR_{m1,asp,4}, ATR_{m1,asp,5}, \dots, ATR_{x,y,z}) \quad (3.24)$$

Onde:

x – Grupo de variedade:

Grupo variedades precoces – Precoce 1 (p1), Precoce 2 (p2), Precoce 3 (p3).

Grupo variedades médias – Média 1 (m1), Média 2 (m2), Média 3 (m3).

Grupo variedades tardias – Tardia 1 (t1), Tardia 2 (t2), Tardia 3 (t3).

y – Bloco de colheita

Aspersão – (asp)

Boa Vista – (bv)

Rodotrem – (rod)

Limeira – (lim)

Serra – (ser)

Sequeiro – (seq)

z – Mês de colheita

Abril (4), Maio (5), Junho (6), Julho (7), ... , Dezembro (12)

Restrições do modelo 03

Quanto às restrições, estas se encontram descritas pelas expressões a seguir:

- Capacidade mensal dos blocos:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} BLO_{x,y,z} \leq BLOT_y \quad (3.25)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$BLO_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$BLOT_y$ – Capacidade mensal (y) de cada bloco de colheita

- Restrição da capacidade mensal da usina:

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} ATR_{x,y,z} MES_{x,y,z} \leq MEST_{y,z} \quad (3.26)$$

Onde:

X – Quantidade disponível por variedade

Y – Capacidade dos blocos de colheita

Z – Total dos meses de colheita

$ATR_{x,y,z}$ – Rendimento em ATR de determinado grupo de variedade (x), bloco de colheita (y) e mês de colheita (z) (ATR)

$MES_{x,y,z}$ – Valor mensal de cada variedade por bloco (ton)

$MEST_{y,z}$ – Capacidade total dos blocos de colheita (y), por mês de safra (z).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo de resultados e discussões foi dividido em dois sub-capítulos: o sub-capítulo de Resultados e o sub-capítulo de Análises. O sub-capítulo de Resultados tem como objetivo apresentar os resultados dos modelos, o sub-capítulo de Análises fornecem discussões sobre os modelos desenvolvidos e comparativos entre si. O capítulo foi dividido em:

- Resultados
 - Resultado da safra Analisada 08/09 – Dados reais
 - Resultado do modelo de apresentação
 - Resultados dos modelos com base no histórico de colheita
 - Modelo 1
 - Modelo 2
 - Modelo 3
 - Resultados dos modelos com base da safra 08/09
 - Modelo 1
 - Modelo 2
 - Modelo 3
- Análises
 - Análise do modelo de apresentação
 - Comparativo dos resultados entre modelos com base de dados histórica com o resultado real.

- Comparativo dos resultados entre os modelos com base na safra 08/09 em relação ao resultado real.
- Análise dos rendimentos de ATR entre os dados reais da safra e os rendimentos históricos.

4.1. RESULTADO DA SAFRA ANALISADA 08/09 – DADOS REAIS

Este tópico foi criado para apresentar o resultado da safra 08/09 de onde foram retirados os rendimentos de ATR das variedades de alguns modelos e também as restrições de capacidade da usina e dos blocos de colheita. O resultado é apresentado na tabela 27 de maneira resumida pois as análises posteriores serão feitas sobre o resultado final obtido na colheita.

	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
ATR médio (ATR)	114,58	115,09	120,05	131,92	137,36	142,45	141,5	132,64	124,51
Quantidade colhida (ton)	11.214	260.350	207.654	263.632	176.369	172.708	175.882	244.697	147.449

Tabela 27: Resultado real da safra 08/09

A quantidade de ATR total produzida com estas variedades na safra 08/09 foi de 215.485 toneladas.

4.2. RESULTADO DO MODELO DE APRESENTAÇÃO

O modelo de apresentação foi desenvolvido no sentido de mostrar para o empreendimento os ganhos esperados com a aplicação do modelo e motivá-lo para a participação efetiva no projeto.

A quantidade mensal colhida por variedade e o rendimento em ATR mensal de cada uma foram demonstradas nas tabelas de 17 a 21, e o resultado final total na tabela 22. O total de ATR da safra com estas variedades foi de 122.744 toneladas de ATR.

O modelo desenvolvido para este problema busca maximizar a produção total de ATR.

Segue abaixo os resultados nas tabelas de 28 a 32 por variedade e o resultado final na tabela 33 que representa a quantidade ideal a ser colhida em cada mês de safra:

RB867515	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Dezembro</i>	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS						62.021,00	110.214,00		172.235,00
ATR	121,8	125,8	133,6	141,9	151,1	158,8	145	131,4	138,68
TOTAL ATR						9.848.935	15.981.030		25.829.964,80

Tabela 28: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade RB867515

RB855453	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Dezembro</i>	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS	133.310,00			33.941,00					167.251,00
ATR	123	127,3	130,1	138,6	151,4	154,8	136,2		137,34
TOTAL ATR	16.397.130			4.704.223					21.101.352,60

Tabela 29: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade RB855453

SP80-1816	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Dezembro</i>	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS					71.113,00			54.529,00	125.642,00
ATR	116,6	126,1	135,6	131,1	157,2	152,7	140,1	136,9	137,04
TOTAL ATR					11.178.964			7.465.020	18.643.983,70

Tabela 30: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade SP80-1816

SP80-3280	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Dezembro</i>	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS		134.589,00							134.589,00
ATR	97,2	134,1	128,9	126,1	139,8	147,7	132	118,5	128,04
TOTAL ATR		18.048.385							18.048.384,90

Tabela 31: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade SP80-3280

SP83-2847	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Dezembro</i>	TOTAL-VARIEDADE
TONELADAS		32.616,00	115.469,00	102.833,00	23.893,00	44.022,00			318.833,00
ATR	111,6	125,6	133,5	134,8	149	151,4	128,8	123,3	132,25
TOTAL ATR		4.096.570	15.415.112	13.861.888	3.560.057	6.664.931			43.598.557,30

Tabela 32: Resultado obtido no modelo de apresentação – Variedade SP83-2847

OTIMIZADO	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Dezembro</i>	TOTAL
TON / MÊS	133.310,00	167.205,00	115.469,00	136.774,00	95.006,00	106.043,00	110.214,00	54.529,00	918.550,00
ATR MÉDIO	123	132	134	136	155	156	145	137	139,68

Tabela 33: Resultado final por toneladas e ATR médio.

O total de ATR do modelo otimizado foi de 127.222 toneladas. O ganho em relação ao que ocorreu na safra foi de aproximadamente 3,65%. O ganho ocorre devido ao melhor ajuste na escala de colheita em relação aos índices mensais de ATR disponíveis pelas variedades. O aumento geral no índice total de ATR não significa que houve um aumento em todas as variedades o que será mostrado a seguir:

Variedade RB867515	
Total ATR - Safra real	23.492.030,40
Total ATR - Modelo otimizado	25.829.964,80
Diferença	9,95%

Tabela 34: Diferença de produtividade da variedade RB867515 no modelo de apresentação

Variedade RB855453	
Total ATR - Safra real	21.528.472,60
Total ATR - Modelo otimizado	21.101.352,60
Diferença	1,98%

Tabela 35: Diferença de produtividade da variedade RB855453 no modelo de apresentação

Variedade SP80-1816	
Total ATR - Safra real	17.512.126,00
Total ATR - Modelo otimizado	18.643.983,70
Diferença	6,46%

Tabela 36: Diferença de produtividade da variedade SP80-1816 no modelo de apresentação

Variedade SP80-3280	
Total ATR - Safra real	18.228.550,30
Total ATR - Modelo otimizado	18.048.384,90
Diferença	0,99%

Tabela 37: Diferença de produtividade da variedade SP80-3280 no modelo de apresentação

Variedade SP83-2847	
Total ATR - Safra real	41.983.150,40
Total ATR - Modelo otimizado	43.598.557,30
Diferença	3,85%

Tabela 38: Diferença de produtividade da variedade SP83-2847 no modelo de apresentação

O objetivo do modelo foi maximizar o valor total. Para isso, em alguns casos, a programação sugeriu retirar do campo uma determinada variedade mesmo sabendo que em outro ponto de sua curva de maturação ela estaria com um rendimento melhor. As variedades RB 855453 e SP80-3280 apresentaram produtividade total abaixo do ocorrido na safra. As demais variedades tiveram seus rendimentos totais impulsionados que elevaram o ganho total em 3,65%.

Segue abaixo curva com ATR médio da safra real e curva de ATR médio de modelo proposto:

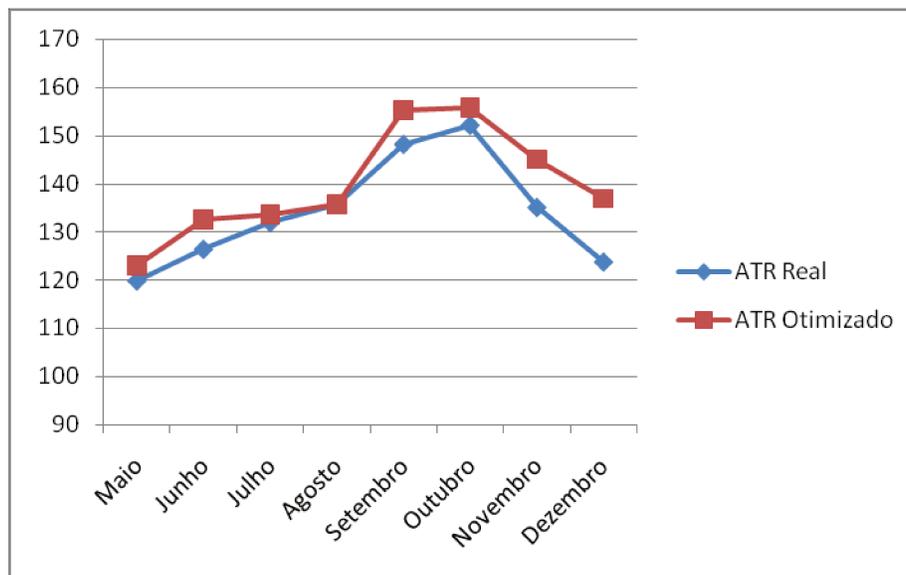


Figura 25: Diferença entre ATR real e ATR otimizado no modelo de apresentação

4.3. RESULTADO DOS MODELOS COM BASE NO HISTÓRICO DE COLHEITA

Os modelos propostos utilizaram como base de dados os rendimentos considerados pelo sistema de otimização da usina em estudo, que seria uma média do cultivo das variedades em todo o seu histórico de colheita. Segue abaixo os valores de rendimento em ATR:

<i>ATR - Dados históricos</i>								
	<i>Abril</i>	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>
Precoce - Grupo 1	118,19	124,60	131,84	137,04	140,30	141,41	140,29	137,04
Precoce - Grupo 2	106,65	116,50	126,07	132,57	136,57	137,87	136,30	132,50
Precoce - Grupo 3	100,08	112,33	124,40	132,76	138,05	139,82	138,24	133,79
Média - Grupo 1	103,80	117,26	130,07	138,79	143,62	144,45	141,39	134,99
Média - Grupo 2	98,50	110,48	122,36	130,53	135,64	137,41	135,74	131,37
Média - Grupo 3	96,55	111,03	125,42	135,55	142,32	144,93	143,82	139,45
Tardia - Grupo 1	104,82	116,24	127,29	134,71	139,26	140,28	138,15	133,32
Tardia - Grupo 2	100,08	112,33	124,40	132,76	138,05	139,82	138,24	133,79
Tardia - Grupo 3	98,21	110,19	122,08	130,62	136,47	139,08	138,71	135,65

Tabela 39: Rendimentos com base em histórico de colheita

4.3.1. Resultados do Modelo 01

O modelo 01 tem como objetivo apresentar o pior cenário possível colhendo toda a cana disponível no canavial.

Segue abaixo o resultado da função objetivo do modelo que seria a quantidade de cana colhida mensalmente por cada variedade em cada bloco de colheita:

Bloco Aspersão

Bloco Aspersão - Modelo 01 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1						5.199			5.199
Precoce - Grupo 2					16.373	44.088	12.898		73.359
Precoce - Grupo 3	11.921	54.414	40.476				39.757	23.534	170.102
Média - Grupo 1				67.666	38.687				106.353
Média - Grupo 2			6.483						6.483
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1			9.091						9.091
Tardia - Grupo 2								35.420	35.420
Tardia - Grupo 3	14.793								14.793
Total Toneladas	26.714	54.414	56.050	67.666	55.060	49.287	52.655	58.954	420.800

Tabela 40: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 01

Bloco Boa Vista

Bloco Boa Vista - Modelo 01 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2					22.024	19.281	3.871		45.176
Precoce - Grupo 3	10.686	21.766	22.420	11.622			17.191	16.217	99.901
Média - Grupo 1				15.444					15.444
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2								7.365	7.365
Tardia - Grupo 3									
Total Toneladas	10.686	21.766	22.420	27.066	22.024	19.281	21.062	23.582	167.886

Tabela 41: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 01

Bloco Limeira

Bloco Limeira- Modelo 01 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3							8.085	15.889	23.974
Média - Grupo 1						5.977			5.977
Média - Grupo 2						7.828			7.828
Média - Grupo 3							5.657		5.657
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2								6.870	6.870
Tardia - Grupo 3	10.313	21.006	21.638	26.122	21.256	4.843	6.585		111.763
Total Toneladas	10.313	21.006	21.638	26.122	21.256	18.648	20.327	22.759	162.069

Tabela 42: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 01

Bloco Rodotrem

Bloco Rodotrem - Modelo 01 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1						427			427
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3		23.152	12.619			17.144	34.899	28.507	116.321
Média - Grupo 1				28.806	36.493				65.299
Média - Grupo 2			24.531	12.818					37.349
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2				3.224		16.984		10.567	30.775
Tardia - Grupo 3	17.706	12.913							30.619
Total Toneladas	17.706	36.065	37.150	44.849	36.493	34.555	34.899	39.074	280.790

Tabela 43: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 01

Bloco Sequeiro

Bloco Sequeiro - Modelo 01 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2						10.414			10.414
Precoce - Grupo 3			24.897		25.019	14.519	20.468		84.903
Média - Grupo 1				19.298	3.151				22.449
Média - Grupo 2				12.870					12.870
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1				2.452					2.452
Tardia - Grupo 2							6.471	30.163	36.634
Tardia - Grupo 3	13.668	27.840	3.780						45.287
Total Toneladas	13.668	27.840	28.677	34.620	28.170	24.933	26.940	30.163	215.009

Tabela 44: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 01

Bloco da Serra

Bloco Serra - Modelo 01 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2							4.968		4.968
Precoce - Grupo 3								1.445	1.445
Média - Grupo 1						3.764			3.764
Média - Grupo 2						22.957			22.957
Média - Grupo 3								482	482
Tardia - Grupo 1								10.541	10.541
Tardia - Grupo 2								5.323	5.323
Tardia - Grupo 3	26.403	53.781	55.398	66.879	54.419	20.996	47.074	40.478	365.430
Total Toneladas	26.403	53.781	55.398	66.879	54.419	47.717	52.042	58.269	414.910

Tabela 45: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 01

O modelo 01 apresenta como resultado geral os ATR médios mensais abaixo:

<i>MÊS</i>	<i>ATR</i>
ABRIL	104
MAIO	114
JUNHO	127
JULHO	134
AGOSTO	140
SETEMBRO	143
OUTUBRO	141
NOVEMBRO	135

Tabela 46: Resultado ATR médio Modelo 01

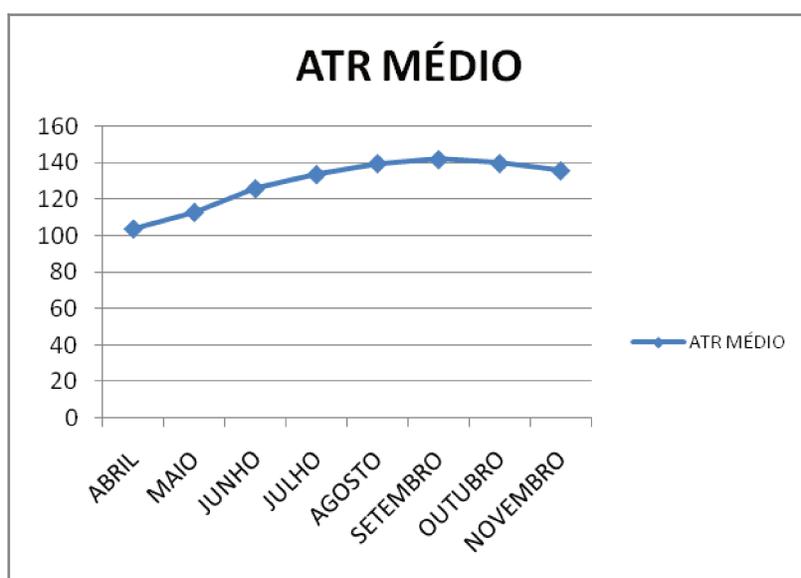


Figura 26: Resultado mensal ATR médio Modelo 01

O modelo 01 apresenta como resultado geral de todo o ano de safra o valor de 212.720.575 quilos de ATR.

4.3.2. Resultados do Modelo 02

O modelo 02 tem como objetivo maximizar o rendimento total do canavial, com quantidade disponível restrita das variedades e colheita mensal pré-determinada nos blocos de colheita.

Segue abaixo resultado da função objetivo para as variedades dentro dos blocos de colheita:

Bloco Aspersão

Bloco Aspersão - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1	5.199								5.199
Precoce - Grupo 2	12.315	54.414	6.630						73.359
Precoce - Grupo 3				67.666	55.060	47.376			170.102
Média - Grupo 1			14.000				33.399	58.954	106.353
Média - Grupo 2							6.483		6.483
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						9.091			9.091
Tardia - Grupo 2			35.420						35.420
Tardia - Grupo 3						2.020	12.773		14.793
Total Toneladas	17.514	54.414	56.050	67.666	55.060	58.487	52.655	58.954	420.800

Tabela 47: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 02

Bloco da Boa Vista

Bloco Boa Vista - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2	6.572	21.766	16.839						45.176
Precoce - Grupo 3				25.283	22.024	23.395	21.062	8.138	99.901
Média - Grupo 1								15.444	15.444
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2			5.581	1.784					7.365
Tardia - Grupo 3									
Total Toneladas	6.572	21.766	22.420	27.066	22.024	23.395	21.062	23.582	167.886

Tabela 48: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 02

Bloco de Limeira

Bloco Limeira - Modelo 02 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maió</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3		7.926	14.768	1.280					23.974
Média - Grupo 1	5.977								5.977
Média - Grupo 2		7.828							7.828
Média - Grupo 3	405	5.252							5.657
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2			6.870						6.870
Tardia - Grupo 3				24.842	21.256	22.579	20.327	22.759	111.763
Total Toneladas	6.382	21.006	21.638	26.122	21.256	22.579	20.327	22.759	162.069

Tabela 49: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 02

Bloco Rodotrem

Bloco Rodotrem - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maió</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1	427								427
Precoce - Grupo 2	13.069	3.915							16.984
Precoce - Grupo 3			26.583	44.849	36.493	8.397			116.321
Média - Grupo 1		32.150						33.149	65.299
Média - Grupo 2							31.424	5.925	37.349
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						3.224			3.224
Tardia - Grupo 2			10.567						10.567
Tardia - Grupo 3						27.144	3.475		30.619
Total Toneladas	13.496	36.065	37.150	44.849	36.493	38.765	34.899	39.074	280.790

Tabela 50: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 02

Bloco Sequeiro

Bloco Sequeiro - Modelo 02 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2	8.677	1.737							10.414
Precoce - Grupo 3				30.316	28.170	26.417			84.903
Média - Grupo 1		22.449							22.449
Média - Grupo 2								12.870	12.870
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						2.452			2.452
Tardia - Grupo 2		3.653	28.677	4.304					36.634
Tardia - Grupo 3						1.055	26.940	17.293	45.287
Total Toneladas	8.677	27.840	28.677	34.620	28.170	29.924	26.940	30.163	215.009

Tabela 51: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 02

Bloco da Serra

Bloco Serra - Modelo 02 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2	4.968								4.968
Precoce - Grupo 3		1.445							1.445
Média - Grupo 1	3.764								3.764
Média - Grupo 2	7.099	15.858							22.957
Média - Grupo 3	482								482
Tardia - Grupo 1		10.541							10.541
Tardia - Grupo 2		5.323							5.323
Tardia - Grupo 3		20.614	55.398	66.879	54.419	57.807	52.042	58.269	365.430
Total Toneladas	16.313	53.781	55.398	66.879	54.419	57.807	52.042	58.269	414.910

Tabela 52: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 02

O modelo 02 apresenta como resultado geral os ATRs médios abaixo:

<i>MÊS</i>	<i>ATR</i>
ABRIL	102
MAIO	115
JUNHO	125
JULHO	135
AGOSTO	140
SETEMBRO	142
OUTUBRO	139
NOVEMBRO	134

Tabela 53: Resultado ATR médio modelo 02

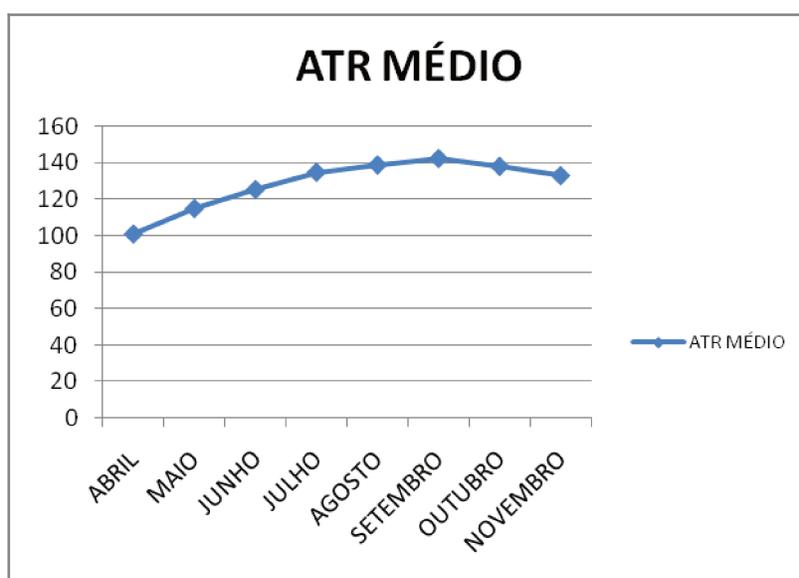


Figura 27: Resultado mensal ATR médio modelo 02

O modelo 02 apresenta como resultado geral de todo o ano de safra o valor de 216.748.930 quilos de ATR.

4.3.3. Resultados do Modelo 03

O modelo 03 consiste em um modelo em que as restrições por variedade estão desativadas, ou seja, o modelo está restrito a quantidade de cana disponível por bloco de colheita. Assim, o modelo serve como base para a programação de plantio para o próximo ano e também seria o índice de total produtividade disponível no canavial.

Segue abaixo resultado da função objetivo para as variedades dentro dos blocos de colheita:

Bloco Aspersão

Bloco Aspersão - Modelo 03 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1	26.142	53.250	54.851						134.243
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2				66.218	53.881			57.693	177.793
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2									
Tardia - Grupo 3						57.236	51.528		108.764
Total Toneladas	26.142	53.250	54.851	66.218	53.881	57.236	51.528	57.693	420.800

Tabela 54: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 03

Bloco da Boa Vista

Bloco Boa Vista - Modelo 03 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2	10.430	21.245	21.884	26.419					79.978
Precoce - Grupo 3					21.497	22.835	20.558		64.890
Média - Grupo 1								23.018	23.018
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2									
Tardia - Grupo 3									
Total Toneladas	10.430	21.245	21.884	26.419	21.497	22.835	20.558	23.018	167.886

Tabela 55: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 03

Bloco de Limeira

Bloco Limeira - Modelo 03 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2				25.504	20.752			22.220	68.476
Média - Grupo 3	10.069	20.509	21.126						51.703
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2									
Tardia - Grupo 3						22.044	19.846		41.890
Total Toneladas	10.069	20.509	21.126	25.504	20.752	22.044	19.846	22.220	162.069

Tabela 56: Quantidade mensal colhida por variedade no Bloco Limeira – modelo 03

Bloco Rodotrem

Bloco Rodotrem - Modelo 03 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1	17.444	35.532	36.601						89.577
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2				44.186	35.954			38.497	118.637
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2									
Tardia - Grupo 3						38.192	34.383		72.576
Total Toneladas	17.444	35.532	36.601	44.186	35.954	38.192	34.383	38.497	280.790

Tabela 57: Quantidade mensal colhida por variedade no Bloco Rodotrem – modelo 03

Bloco Sequeiro

Bloco Sequeiro - Modelo 03 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2	13.357	27.208	28.026						68.592
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2				33.835	27.531			29.478	90.844
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2									
Tardia - Grupo 3						29.245	26.328		55.573
Total Toneladas	13.357	27.208	28.026	33.835	27.531	29.245	26.328	29.478	215.009

Tabela 58: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 03

Bloco da Serra

Bloco Serra - Modelo 03 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2	25.776	52.504	54.083						132.364
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2				65.292	53.127			56.885	175.304
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2									
Tardia - Grupo 3						56.435	50.807		107.242
Total Toneladas	25.776	52.504	54.083	65.292	53.127	56.435	50.807	56.885	414.910

Tabela 59: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 03

Segue abaixo resultado dos ATR médios mensais:

<i>MÊS</i>	<i>ATR</i>
ABRIL	100
MAIO	114
JUNHO	125
JULHO	135
AGOSTO	138
SETEMBRO	140
OUTUBRO	138
NOVEMBRO	137

Tabela 60: Resultado ATR médio modelo 03

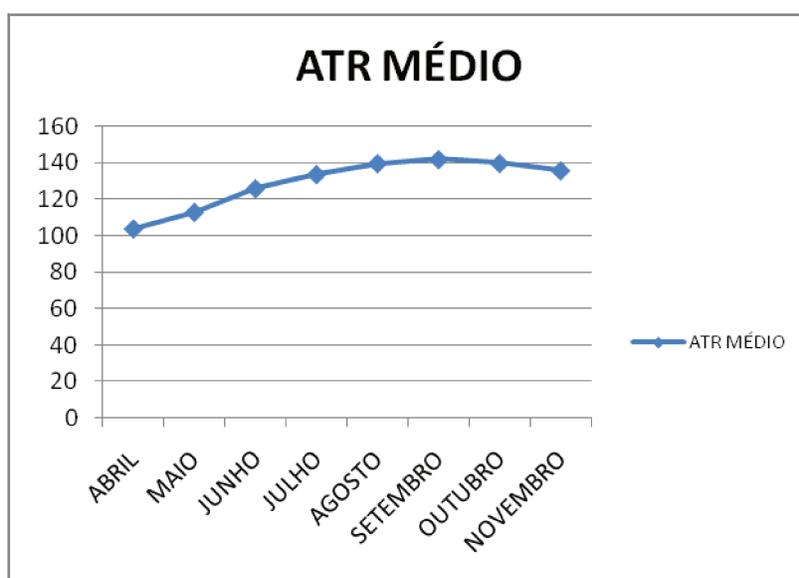


Figura 28: Resultado ATR médio mensal modelo 03

O modelo 03 apresenta como resultado geral da safra o valor de 219.080.147 quilos de ATR. O indicador ATR é utilizado para açúcar e etanol.

4.4. RESULTADO DOS MODELOS COM BASE DE DADOS DA SAFRA 08/09

Os modelos abaixo foram construídos tendo como referência os rendimentos das variedades da última safra. Segue abaixo os valores de ATR considerados:

ATR - Dados reais (safra 08/09)								
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>
Precoce - Grupo 1	118,19	117,91	127,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Precoce - Grupo 2	107,21	116,30	123,66	128,78	139,88	143,16	112,58	116,33
Precoce - Grupo 3	113,72	115,78	121,57	133,38	139,11	143,13	140,63	134,16
Média - Grupo 1	98,50	108,56	117,17	128,89	130,36	132,45	136,14	130,89
Média - Grupo 2	118,12	112,85	114,42	127,47	135,75	140,68	142,49	131,05
Média - Grupo 3	104,82	127,93	129,01	134,44	140,45	146,71	138,15	108,64
Tardia - Grupo 1	100,08	111,83	119,42	134,15	136,43	146,20	140,78	138,12
Tardia - Grupo 2	124,20	112,31	119,33	136,04	130,78	144,98	141,21	133,09
Tardia - Grupo 3	104,77	116,69	119,57	134,78	139,38	144,48	146,43	130,22

Tabela 61: Índices ATR reais da safra 08/09

4.4.1. Resultados do Modelo 01

O modelo 01 apresenta as mesmas restrições em relação ao modelo 01 anterior, mas os índices de ATR que representam a produtividade de cada variedade estão de acordo com os valores da última safra.

O modelo 01 busca apresentar o pior cenário possível desde que o canavial seja completamente colhido.

Segue abaixo resultado da função objetivo por bloco de colheita:

Bloco Aspersão

Bloco Aspersão - Modelo 01 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1						5.199			5.199
Precoce - Grupo 2							52.655	20.704	73.359
Precoce - Grupo 3		29.412	49.567	67.666				23.457	170.102
Média - Grupo 1	17.623	25.002			19.640	44.088			106.353
Média - Grupo 2			6.483						6.483
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1	9.091								9.091
Tardia - Grupo 2					35.420				35.420
Tardia - Grupo 3								14.793	14.793
Total Toneladas	26.714	54.414	56.050	67.666	55.060	49.287	52.655	58.954	420.800

Tabela 62: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 01

Bloco Boa Vista

Bloco Boa Vista - Modelo 01 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2				532			21.062	23.582	45.176
Precoce - Grupo 3		21.766	22.420	26.534	14.659	14.523			99.901
Média - Grupo 1	10.686					4.758			15.444
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2					7.365				7.365
Tardia - Grupo 3									
Total Toneladas	10.686	21.766	22.420	27.066	22.024	19.281	21.062	23.582	167.886

Tabela 63: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 01

Bloco de Limeira

Bloco Limeira - Modelo 01 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3				3.647			20.327		23.974
Média - Grupo 1						5.977			5.977
Média - Grupo 2				7.828					7.828
Média - Grupo 3								5.657	5.657
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2					6.870				6.870
Tardia - Grupo 3	10.313	21.006	21.638	14.647	14.386	12.671		17.102	111.763
Total Toneladas	10.313	21.006	21.638	26.122	21.256	18.648	20.327	22.759	162.069

Tabela 64: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 01

Bloco Rodotrem

Bloco Rodotrem - Modelo 01 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1						427			427
Precoce - Grupo 2							16.984		16.984
Precoce - Grupo 3		36.065		44.649	9.237		17.915	8.455	116.321
Média - Grupo 1	14.482				16.689	34.128			65.299
Média - Grupo 2			37.150	199					37.349
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1	3.224								3.224
Tardia - Grupo 2					10.567				10.567
Tardia - Grupo 3								30.619	30.619
Total Toneladas	17.706	36.065	37.150	44.849	36.493	34.555	34.899	39.074	280.790

Tabela 65: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem- modelo 01

Bloco Sequeiro

Bloco Sequeiro - Modelo 01 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2							10.414		10.414
Precoce - Grupo 3		19.376	11.898	34.620		2.484	16.526		84.903
Média - Grupo 1						22.449			22.449
Média - Grupo 2			12.870						12.870
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1	2.452								2.452
Tardia - Grupo 2		8.464			28.170				36.634
Tardia - Grupo 3	11.216		3.909					30.163	45.287
Total Toneladas	13.668	27.840	28.677	34.620	28.170	24.933	26.940	30.163	215.009

Tabela 66: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 01

Bloco da Serra

Bloco Serra - Modelo 01 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maio</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2							4.968		4.968
Precoce - Grupo 3							1.445		1.445
Média - Grupo 1						3.764			3.764
Média - Grupo 2				22.957					22.957
Média - Grupo 3								482	482
Tardia - Grupo 1							10.541		10.541
Tardia - Grupo 2					5.323				5.323
Tardia - Grupo 3	26.403	53.781	55.398	43.922	49.096	54.043	24.998	57.787	365.430
Total Toneladas	26.403	53.781	55.398	66.879	54.419	57.807	41.952	58.269	414.910

Tabela 67: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 01

O resultado geral dos ATRs médios mensais está descrito abaixo:

<i>MÊS</i>	<i>ATR</i>
ABRIL	104
MAIO	113
JUNHO	126
JULHO	134
AGOSTO	140
SETEMBRO	142
OUTUBRO	140
NOVEMBRO	136

Tabela 68: Resultado ATR médio modelo 01

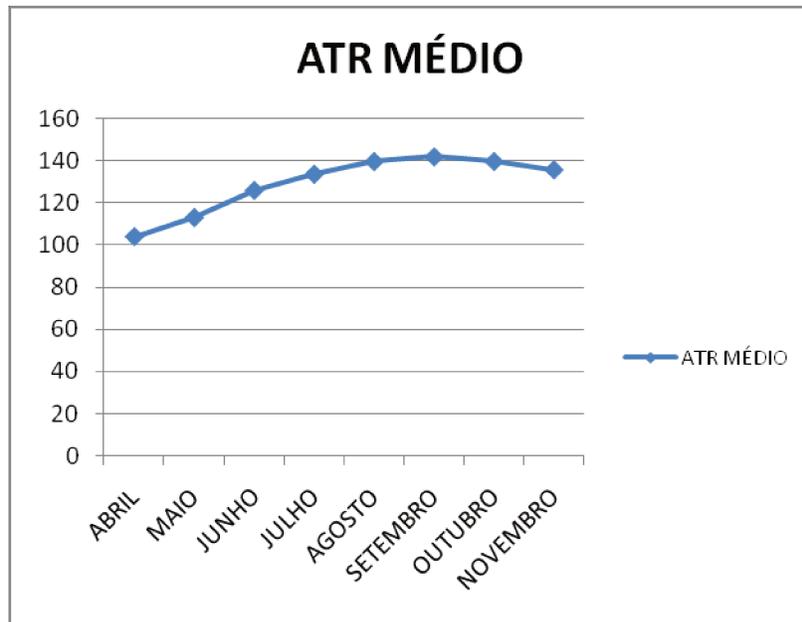


Figura 29: Resultado ATR médio mensal modelo 01

O resultado geral do modelo foi de 208.506.274 quilos de ATR.

4.4.2. Resultados do Modelo 02

O modelo 02 tem como principal objetivo a maximização da produção total da usina, obedecendo às restrições mensais dos blocos de colheita e à quantidade total disponível por cada variedade.

O resultado da função objetivo nos blocos de colheita segue abaixo:

Bloco Aspensão

Bloco Aspensão - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maió</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1			5.199						5.199
Precoce - Grupo 2			50.851		22.508				73.359
Precoce - Grupo 3		45.214		11.561	32.552	49.396	31.379		170.102
Média - Grupo 1				47.399				58.954	106.353
Média - Grupo 2							6.483		6.483
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						9.091			9.091
Tardia - Grupo 2	26.714			8.706					35.420
Tardia - Grupo 3							14.793		14.793
Total Toneladas	26.714	45.214	56.050	67.666	55.060	58.487	52.655	58.954	420.800

Tabela 69: Quantidade colhida mensal por variedade no bloco Aspensão – modelo 02

Bloco Boa Vista

Bloco Boa Vista - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Maió</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2		732	22.420		22.024				45.176
Precoce - Grupo 3		20.240		27.066		23.395	21.062	8.138	99.901
Média - Grupo 1								15.444	15.444
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2	7.365								7.365
Tardia - Grupo 3									
Total Toneladas	7.365	20.972	22.420	27.066	22.024	23.395	21.062	23.582	167.886

Tabela 70: Quantidade colhida mensal por variedade no bloco Boa Vista – modelo 02

Bloco Limeira

Bloco Limeira - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3			11.577					12.397	23.974
Média - Grupo 1								5.977	5.977
Média - Grupo 2	3.443							4.385	7.828
Média - Grupo 3		5.657							5.657
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2	6.870								6.870
Tardia - Grupo 3		11.418	10.061	26.122	21.256	22.579	20.327		111.763
Total Toneladas	10.313	17.075	21.638	26.122	21.256	22.579	20.327	22.759	162.069

Tabela 71: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 02

Bloco Rodotrem

Bloco Rodotrem - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1			427						427
Precoce - Grupo 2			16.984						16.984
Precoce - Grupo 3		31.855		38.362	36.493	9.611			116.321
Média - Grupo 1			19.739	6.486				39.074	65.299
Média - Grupo 2	7.139					25.930	4.280		37.349
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						3.224			3.224
Tardia - Grupo 2	10.567								10.567
Tardia - Grupo 3							30.619		30.619
Total Toneladas	17.706	31.855	37.150	44.849	36.493	38.765	34.899	39.074	280.790

Tabela 72: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 02

Bloco Sequeiro

Bloco Sequeiro - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2			10.414						10.414
Precoce - Grupo 3		22.849	18.263		28.170	10.360		5.262	84.903
Média - Grupo 1								22.449	22.449
Média - Grupo 2						12.870			12.870
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1								2.452	2.452
Tardia - Grupo 2	13.668			22.966					36.634
Tardia - Grupo 3				11.653		6.694	26.940		45.287
Total Toneladas	13.668	22.849	28.677	34.620	28.170	29.924	26.940	30.163	215.009

Tabela 73: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 02

Bloco da Serra

Bloco Serra - Modelo 02 - Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2			4.968						4.968
Precoce - Grupo 3								1.445	1.445
Média - Grupo 1								3.764	3.764
Média - Grupo 2	21.080							1.877	22.957
Média - Grupo 3		482							482
Tardia - Grupo 1								10.541	10.541
Tardia - Grupo 2	5.323								5.323
Tardia - Grupo 3		43.209	50.430	66.879	54.419	57.807	52.042	40.642	365.430
Total Toneladas	26.403	43.691	55.398	66.879	54.419	57.807	52.042	58.269	414.910

Tabela 74: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 02

O resultado geral dos ATRs médios segue na tabela e gráfico abaixo:

<i>MÊS</i>	<i>ATR</i>
ABRIL	101
MAIO	115
JUNHO	125
JULHO	135
AGOSTO	139
SETEMBRO	142
OUTUBRO	138
NOVEMBRO	133

Tabela 75: Resultado ATR médio modelo 02

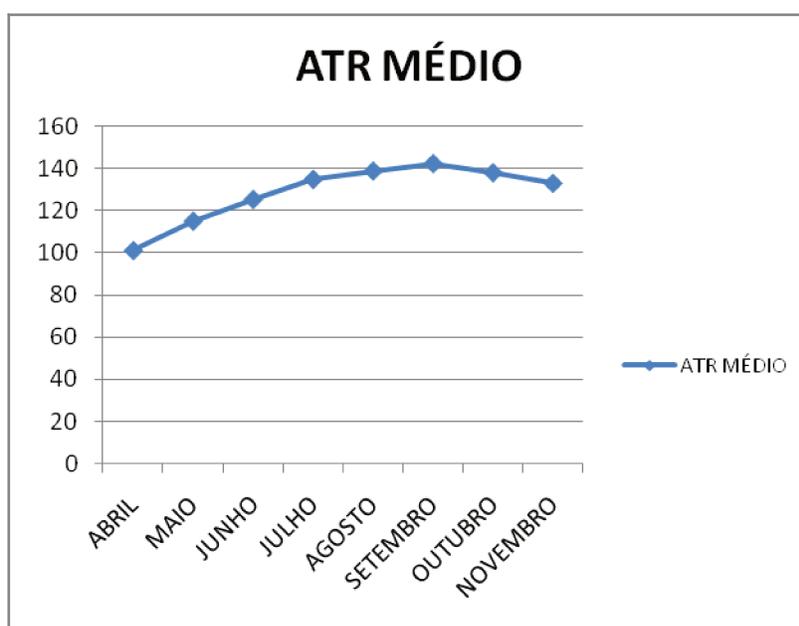


Figura 30: Resultado ATR médio mensal modelo 02

O modelo 02 apresenta como resultado geral da safra 220.385.047 quilos de ATR. Esta medida é proporcional à produção de etanol.

4.4.3. Resultados do Modelo 03

O modelo 03 consiste em um modelo que servirá como base para um futuro plantio, pois as restrições de quantidade disponível por variedade foi anulada e o sistema determina qual variedade e quantidade otimizarão o modelo.

Segue abaixo os valores da função objetivo referente aos blocos de colheita:

Bloco Aspersão

Bloco Aspersão - Modelo 03 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1		53.250	54.851						108.101
Precoce - Grupo 2					53.881				53.881
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						57.236		57.693	114.929
Tardia - Grupo 2	26.142			66.218					92.361
Tardia - Grupo 3							51.528		51.528
Total Toneladas	26.142	53.250	54.851	66.218	53.881	57.236	51.528	57.693	420.800

Tabela 76: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Aspersão – modelo 03

Bloco Boa Vista

Bloco Boa Vista - Modelo 03 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2		21.245	21.884		21.497				64.626
Precoce - Grupo 3								23.018	23.018
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2	10.430			26.419		22.835	20.558		80.242
Tardia - Grupo 3									
Total Toneladas	10.430	21.245	21.884	26.419	21.497	22.835	20.558	23.018	167.886

Tabela 77: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Boa Vista – modelo 03

Bloco Limeira

Bloco Limeira - Modelo 03 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3								22.220	22.220
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3		20.509	21.126		20.752	22.044			84.431
Tardia - Grupo 1									
Tardia - Grupo 2	10.069			25.504					35.572
Tardia - Grupo 3							19.846		19.846
Total Toneladas	10.069	20.509	21.126	25.504	20.752	22.044	19.846	22.220	162.069

Tabela 78: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Limeira – modelo 03

Bloco Rodotrem

Bloco Rodotrem - Modelo 03 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1		35.532	36.601						72.133
Precoce - Grupo 2					35.954				35.954
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						38.192		38.497	76.689
Tardia - Grupo 2	17.444			44.186					61.630
Tardia - Grupo 3							34.383		34.383
Total Toneladas	17.444	35.532	36.601	44.186	35.954	38.192	34.383	38.497	280.790

Tabela 79: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Rodotrem – modelo 03

Bloco Sequeiro

Bloco Sequeiro - Modelo 03 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2			28.026		27.531				55.557
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3									
Tardia - Grupo 1						29.245		29.478	58.723
Tardia - Grupo 2	13.357			33.835					47.192
Tardia - Grupo 3		27.208					26.328		53.536
Total Toneladas	13.357	27.208	28.026	33.835	27.531	29.245	26.328	29.478	215.009

Tabela 80: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Sequeiro – modelo 03

Bloco da Serra

Bloco Serra - Modelo 03 – Toneladas									
	<i>Abril</i>	<i>Mai</i>	<i>Junho</i>	<i>Julho</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setembro</i>	<i>Outubro</i>	<i>Novembro</i>	<i>Total</i>
Precoce - Grupo 1									
Precoce - Grupo 2									
Precoce - Grupo 3									
Média - Grupo 1									
Média - Grupo 2									
Média - Grupo 3		52.504	54.083		53.127	56.435			216.150
Tardia - Grupo 1								56.885	56.885
Tardia - Grupo 2	25.776			65.292					91.068
Tardia - Grupo 3							50.807		50.807
Total Toneladas	25.776	52.504	54.083	65.292	53.127	56.435	50.807	56.885	414.910

Tabela 81: Quantidade mensal colhida por variedade no bloco Serra – modelo 03

Os valores dos ATRs médios que representam o resultado geral do modelo são:

<i>MÊS</i>	<i>ATR</i>
ABRIL	100
MAIO	115
JUNHO	127
JULHO	133
AGOSTO	139
SETEMBRO	141
OUTUBRO	139
NOVEMBRO	135

Tabela 82: Resultado ATR médio modelo 03

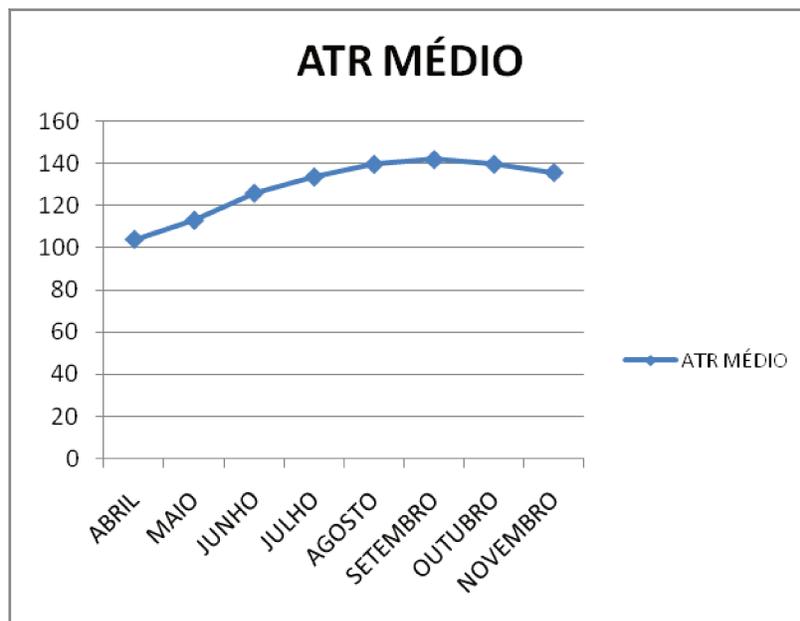


Tabela 83: Resultado ATR médio mensal modelo 03

O modelo 03 apresenta como resultado geral o valor de 225.239.313 quilos de ATR.

4.5. ANÁLISES

Este sub-capítulo busca fazer algumas ponderações e análises sobre os resultados obtidos nos modelos acima citados.

4.5.1. Análise do modelo de Apresentação

O modelo de apresentação foi construído para ilustrar como a programação linear aplicada no campo pode trazer resultados. O modelo é constituído de cinco principais variedades cultivadas na usina que tiveram sua colheita otimizada. Os resultados reais apresentados e o modelo otimizado foram respectivamente 122.744 e 127.222 quilos de ATR, um ganho de 3,65% como havia sido mostrado anteriormente.

Para a análise deste modelo foram utilizadas algumas premissas que serão apresentadas abaixo:

- Eficiência industrial (recuperação) = 88%
- Valor do ATR (safra 08/09) = R\$ 0,2782 / kg ATR
- Valor do açúcar (Mercado externo) safra 08/09 – líquido impostos = R\$ 450,60 / ton
- Custo da industrialização (preço médio / usinas) = R\$ 80 / ton

Todos os índices utilizados acima são informações oferecidas à usina por intermédio da Única. São dados médios de todas as usinas e não particular à usina em estudo.

Segue abaixo valores proporcionais a este ganho em dinheiro:

<i>Indicadores</i>	<i>Valores</i>
Diferença entre real e otimizado (ATR)	4.478.000,00
Valor real considerando perdas 12% (ATR)	3.940.640,00
Valor ATR - Safra 08/09 (R\$ / kg)	0,28
Valor Açúcar - Mercado externo (R\$ / kg)	0,59
Custo industrialização (R\$ /kg)	0,08
Estimativa total de ganho (R\$)	913440

Tabela 84: Cálculo de conversão de toneladas de cana em valores monetários

A obtenção a estimativa de ganho foi feita através da seguinte fórmula:

$$QATR_f = QATR_i - (QATR_i * 0,12) \quad (4.1)$$

$$QATR_f = QATR_i * 0,88 \quad (4.2)$$

$$ETG = (QATR_f * V_{a\grave{c}}) - (QATR_f * V_{atr}) - (QATR_f * C_{ind}) \quad (4.3)$$

Onde:

$QATR_i$ = Diferença de ATR entre real e otimizado (Quantidade inicial).

$QATR_f$ = Valor de ATR considerando as perdas de 12% (Quantidade final).

$V_{a\grave{c}}$ = Valor do açúcar – Mercado externo (R\$/kg)

V_{atr} = Valor do atr – safra 08/09 (R\$/kg)

C_{ind} = Custo de industrialização (R\$/kg)

ETG: Estimativa total de ganho (R\$)

A diferença de R\$ 913.440,00 é um valor significativo considerando o número de toneladas colhidas de 918.550 toneladas. Considerando que a usina possui uma capacidade de moagem de aproximadamente 2,8 milhões de toneladas, o número passaria a R\$ 2.784.320,00. O cálculo feito é para mostrar o poder que um modelo de otimização possui. Os modelos com valores mais próximos da realidade que possuem uma amostragem maior foram feitos abaixo. O número foi o principal motivador de estudo e desenvolvimento dos outros modelos de simulação da colheita.

4.5.2. Análise do modelo com base no histórico de colheita

Os modelos com base no histórico de colheita são aqueles modelos que utilizam todos os dados desde que a variedade foi plantada pela primeira vez no solo da usina. Segue abaixo os rendimentos em ATR dos modelos:

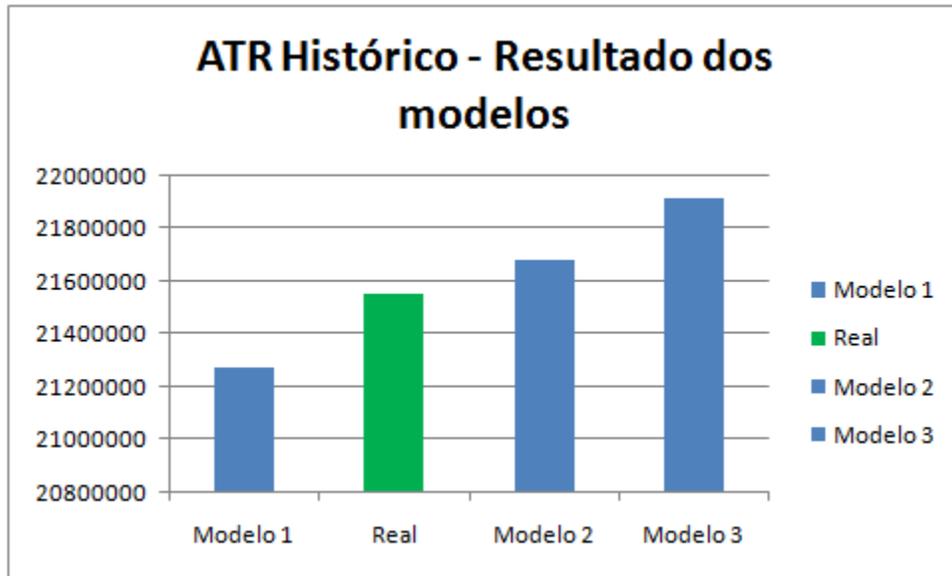


Figura 31: Resultado dos modelos com base de dados histórica e real ocorrido

No gráfico acima, podemos perceber que o resultado ocorrido na safra ficou entre o modelo 01 e modelo 02. O modelo 01 que seria o pior cenário foi de 212.720.575 kgs, o resultado real da safra 08/09 foi de 215.485.000 kgs, o modelo 02, melhor cenário obedecendo às restrições das variedades e dos blocos obteve resultado de 216.748.930 kgs, finalmente o último modelo que apresenta somente restrições dos blocos e não das variedades, apresentou resultado de 219.080.147 kgs. Segue abaixo uma estimativa de ganhos que representam estes resultados obtidos:

Considerando o pior cenário como limite mínimo e os modelos 02 e 03 como limite máximos, obtemos como performance da colheita de 08/09 os valores conforme gráfico abaixo:

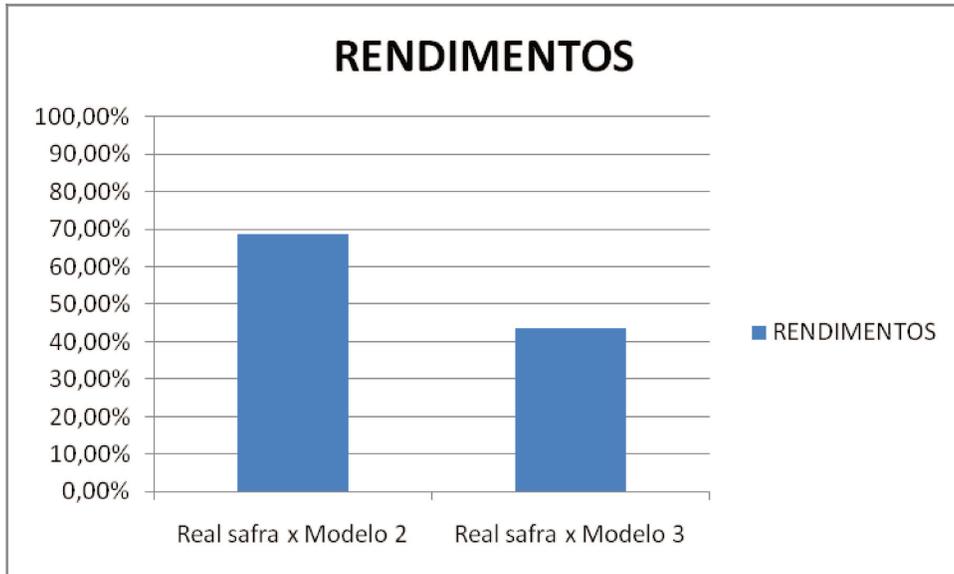


Figura 32: Desempenho do real ocorrido pelo máximo obtido nos modelos 02 e 03.

A safra de 08/09 em comparação com o modelo 2 apresentou rendimento de 68,62%; em comparação com o modelo 3, foi de 43,47%.

Outro resultado dos modelos feitos seriam quais as variedades foram colhidas em cada modelo em cada mês de safra. Este gráfico serve para mostrar um mapa de como as variedades devem ser colhidas durante a safra. Segue gráficos dos modelos abaixo:

Modelo 01- Modelo de pior rendimento possível

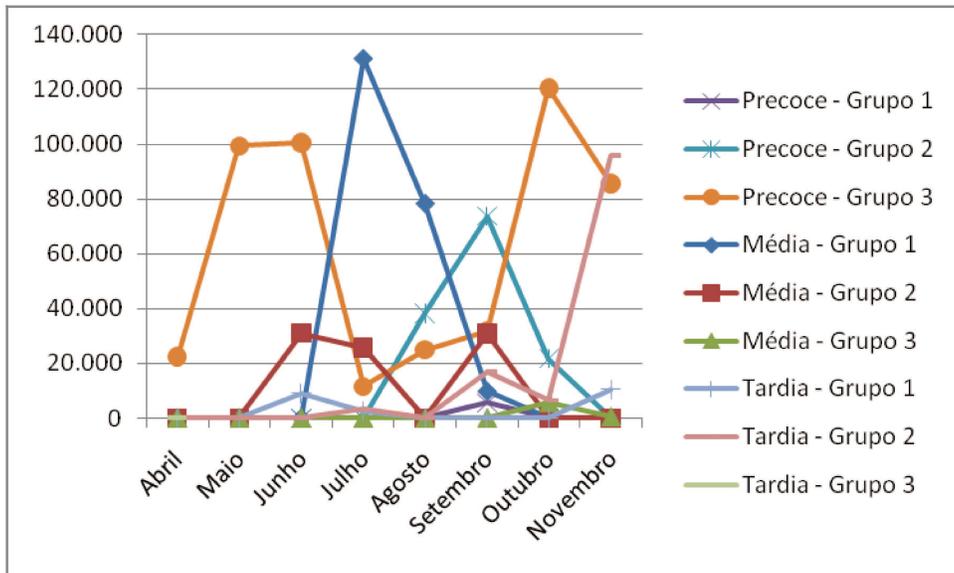


Figura 33: Organização da colheita do modelo 01 com base de dados histórica

Modelo 02 – Modelo de melhor cenário obedecendo restrições de variedade e bloco de colheita.

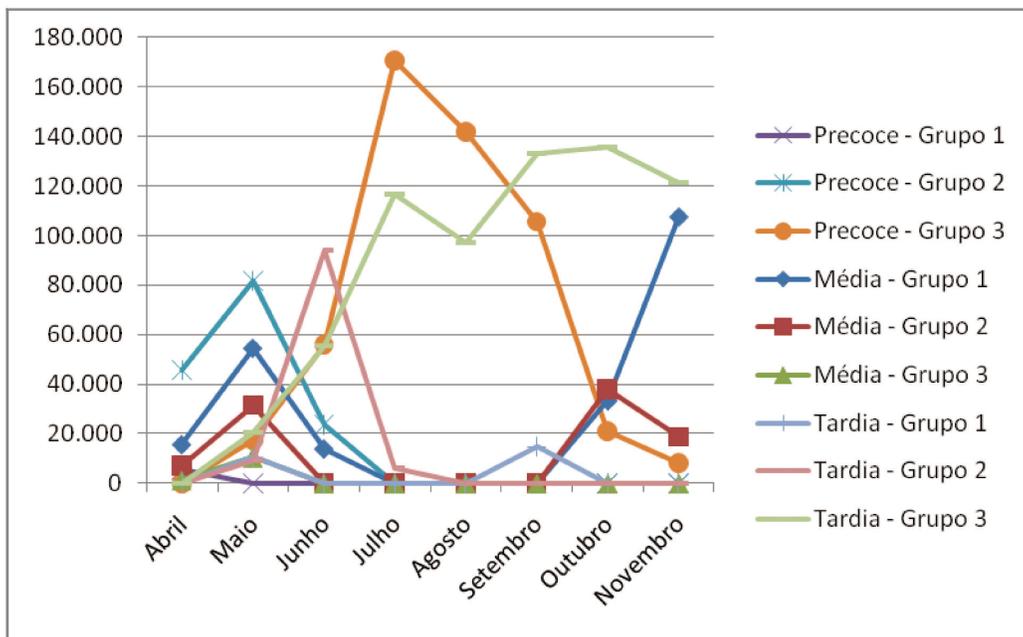


Figura 34: Organização da colheita do modelo 02 com base de dados histórica

Modelo 03 – Modelo de melhor cenário obedecendo somente as restrições do bloco. Programação de pantio.

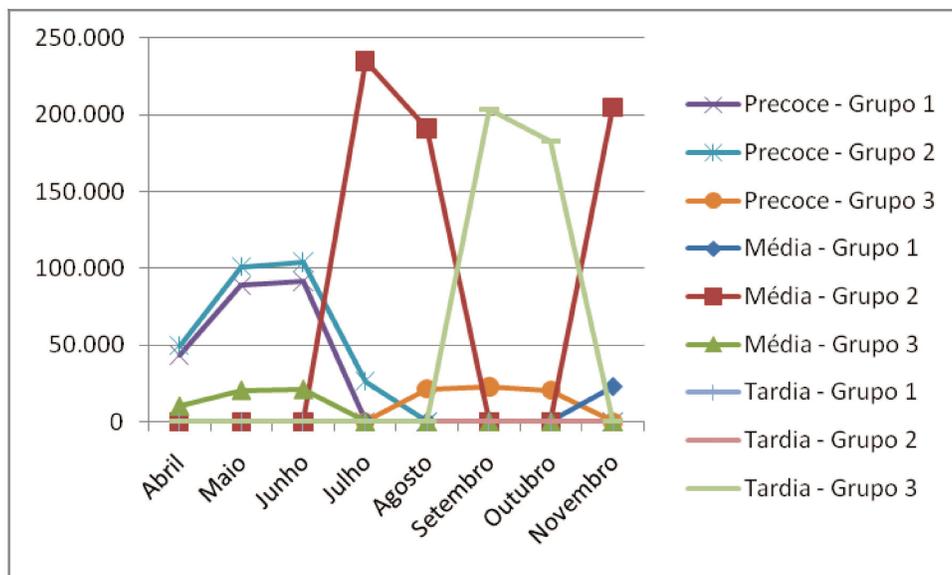


Figura 35: Organização da colheita do modelo 03 com base de dados histórica

Os gráficos acima foram construídos para verificar quais variedades devem ser colhidas em determinado mês de safra e também para comprovar o histórico de algumas variedades como precoce, média e tardia.

4.5.3. Análise do modelo com base do resultado da safra 08/09

Os modelos feitos abaixo foram construídos utilizando a safra de 08/09 como base para os índices de rendimentos das variedades. Segue abaixo o resultado em ATR dos modelos:

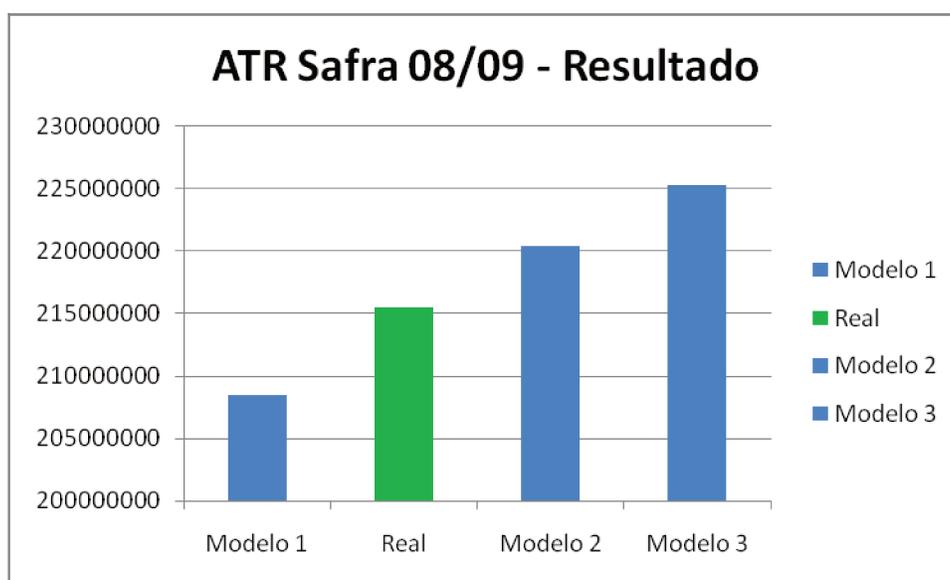


Figura 36: Resultado dos modelos com base de dados da safra 08/09 e real ocorrido.

O resultado real da safra ficou entre o modelo com pior cenário possível e o modelo de melhor cenário obedecendo as restrições de variedade e blocos de colheita, modelo 01 e modelo 02 respectivamente. O Modelo 1 apresentou rendimento de 208.506.274, o resultado real da safra foi de 215.485.000 kgs, o modelo 2 obteve 220.385.047 kgs de ATR e o modelo 3 apresentou o rendimento de 225.239.313 kgs de ATR.

Do mesmo modo como foi feito com os modelos com base de dados históricos, foi atribuído ao modelo 1 o limite mínimo e aos modelos 2 e 3 os limites máximos. Assim, foram obtidos os seguintes resultados:

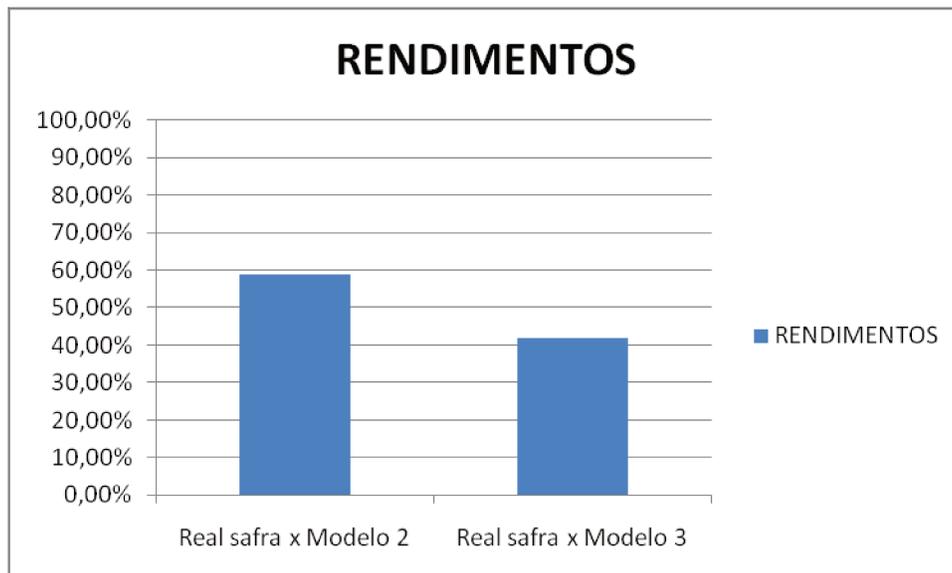


Figura 37: Desempenho do real ocorrido pelo máximo obtido nos modelos 02 e 03

A safra de 08/09 apresentou o rendimento de 58,75% em comparação com o modelo 2 e em relação ao modelo 3, o índice foi de 41,71%.

Os resultados dos modelos feitos serão mostrados abaixo como gráficos em que ilustra a quantidade de cana colhida em cada modelo proposto.

Modelo 01 – Pior cenário possível

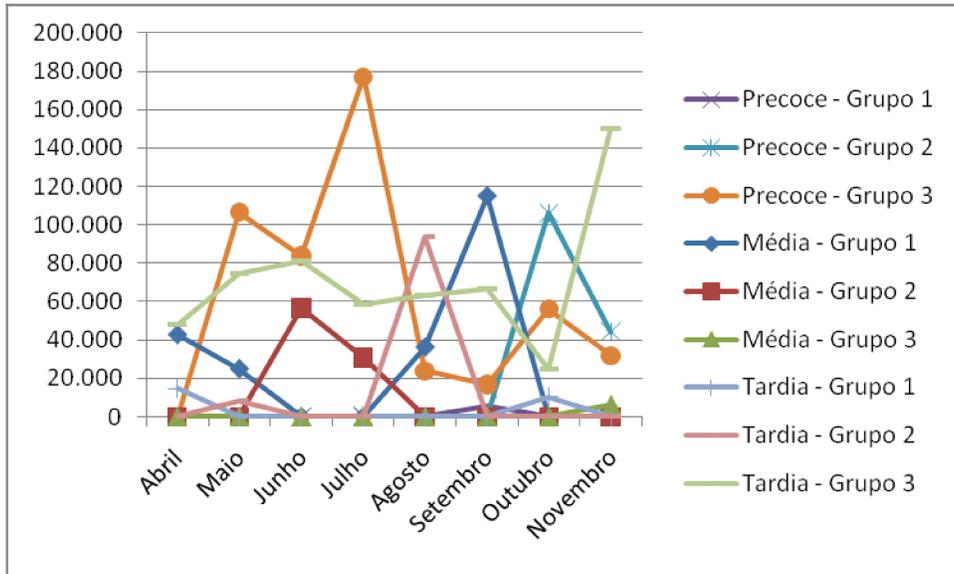


Figura 38: Organização da colheita do modelo 01 com base de dados da safra 08/09

Modelo 02 – Melhor cenário possível considerando as restrições de variedade e bloco de colheita.

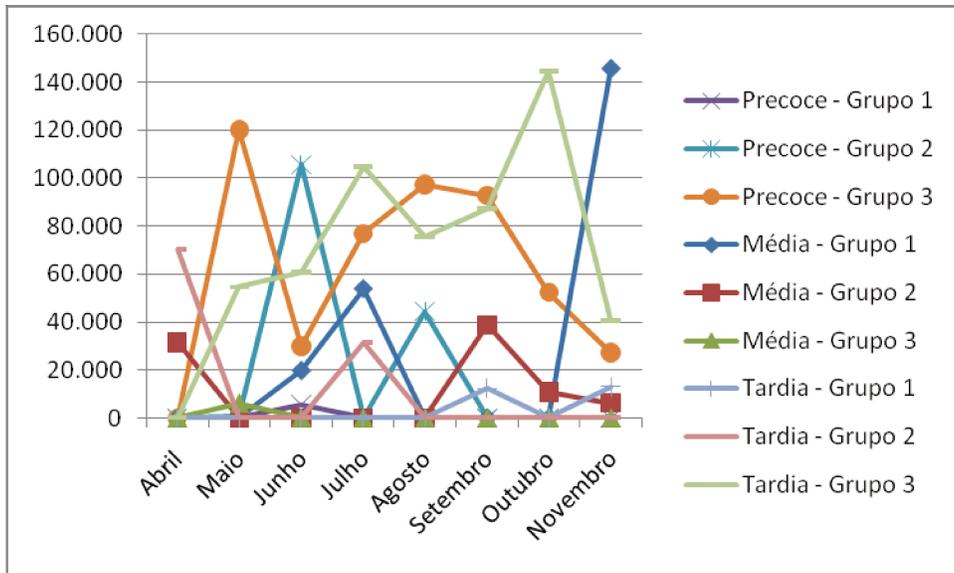


Figura 39: Organização da colheita do modelo 02 com base de dados da safra 08/09

Modelo 03 – Melhor cenário possível considerando somente restrições dos blocos de colheita. Programação de plantio pois a restrição de quantidade total de variedade está inativa.

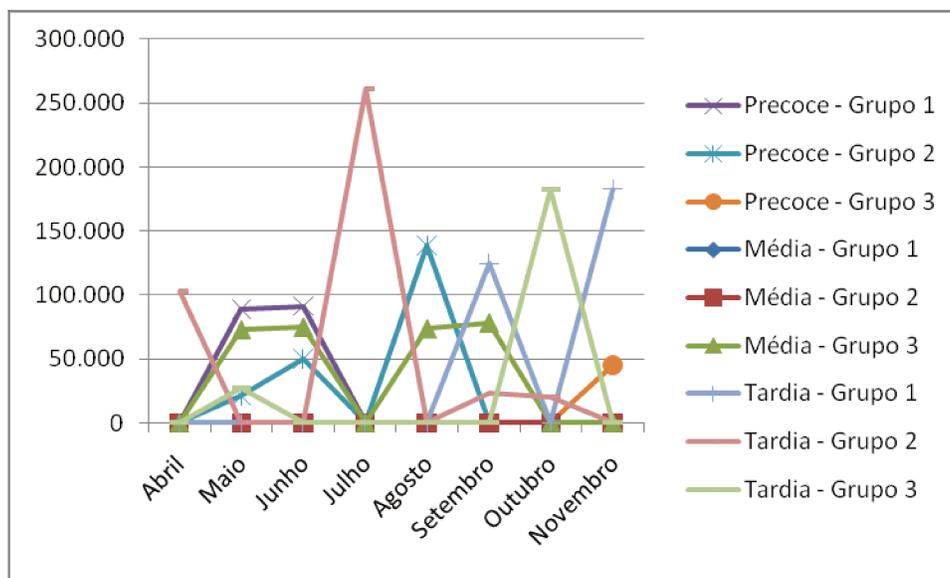


Figura 40: Organização da colheita do modelo 03 com base de dados da safra 08/09

Os gráficos foram feitos para mostrar como seria a colheita de cada variedade nos meses de safra. O resultado seria uma forma de analisar os blocos e verificar se as variedades estão sendo colhidas no momento certo.

4.5.4. Análise dos rendimentos de ATR históricos e da última safra

Os modelos desenvolvidos para simulação foram construídos sobre duas diferentes base de dados para a função objetivo. A função objetivo dos modelos propostos são os rendimentos de cada variedade em função do mês de colheita. A base de dados teórica é a base de dados que alimenta o software utilizado na usina para a otimização do canavial, ou seja, a função objetivo que o sistema otimizador visualiza na usina é a média de todos os anos de colheita de determinada variedade no canavial, independente da localização. Segue abaixo gráfico dos dados teóricos:

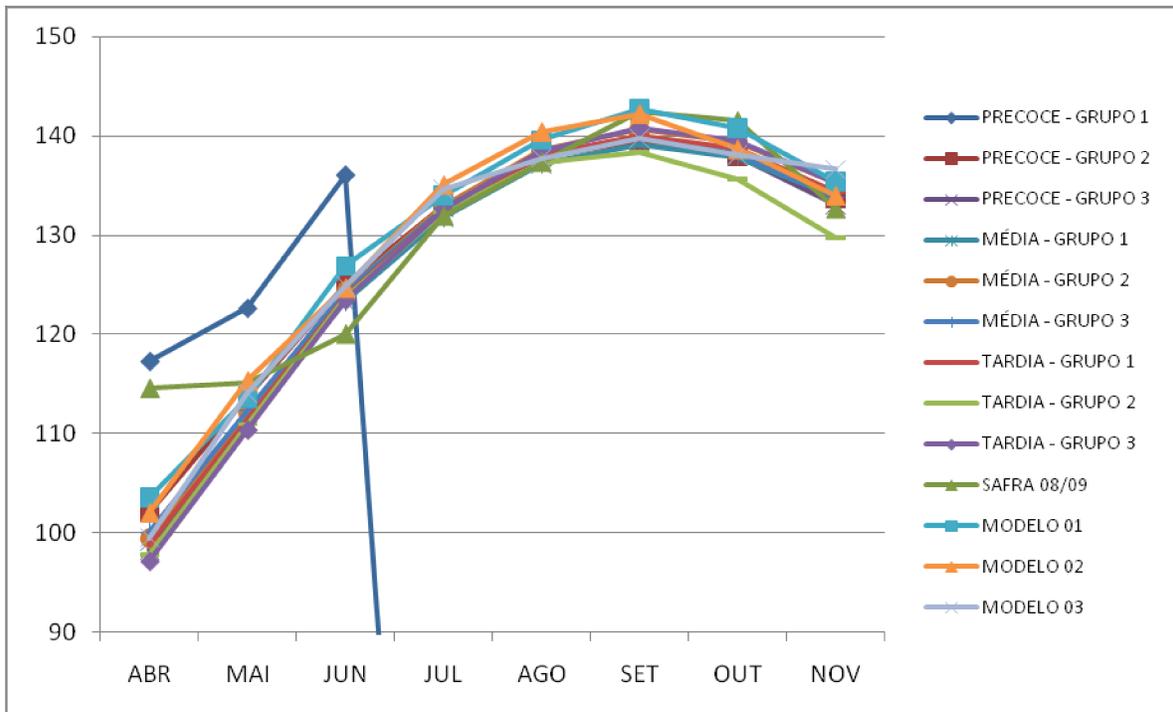


Figura 41: Comparativo Rendimento ATR médio dos modelos com base de dados histórica x real x variedades

O gráfico representa a curva de maturação de nove grupos de variedades nos meses de safra. O resultado apresentado acima mostra que devido ao grande número de amostragens, as curvas das variedades apresentam pouca diferença entre si. Segue abaixo curva das variedades percebidas na safra de 08/09:

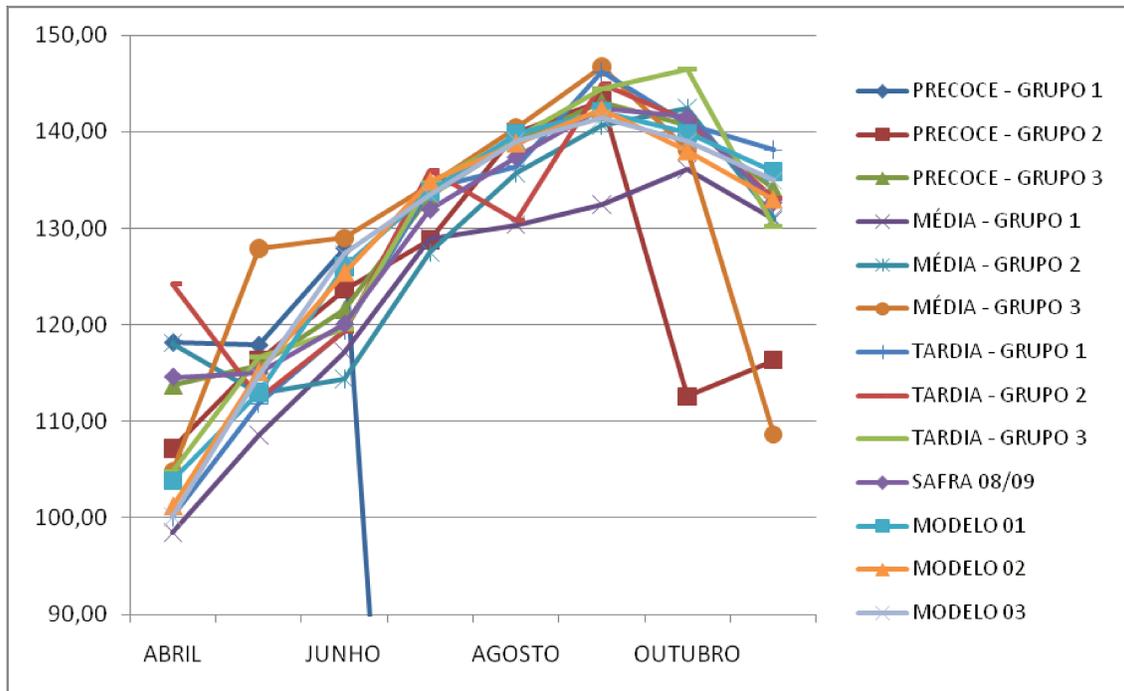


Figura 42: Comparativo Rendimento ATR médio dos modelos com base de dados da safra 08/09 x real x variedades

O gráfico mostra que as curvas de maturação das variedades não são tão suaves como nos modelos com base de dados histórica. As variedades também apresentam maiores diferenças de rendimento entre si. Estas diferenças ocorrem pois as curvas feitas com a base no histórico de colheita são o resultado da média de vários anos de colheita. Desta forma, os rendimentos que são atípicos, que acontecem com grande frequência devido à região de colheita e regime de chuvas, desaparecem no gráfico.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo do estudo foi desenvolver um sistema que sirva de suporte à decisão do agrônomo responsável pela programação de colheita em um empreendimento agrícola de cana de açúcar. O estudo desenvolveu três modelos:

Modelo 01: Teve como objetivo minimizar o aproveitamento do canavial, desde que atenda a especificação de colheita estabelecida para cada área da usina.

Modelo 02: Teve como objetivo a maximização do aproveitamento agrícola, obedecendo todas as restrições do negócio como: capacidade de processamento pela usina, restrições específicas para cada bloco de colheita, a quantidade disponível de cada variedade.

Modelo 03: Teve o mesmo objetivo do Modelo 02, entretanto considerou disponibilidade infinita para cada variedade.

A finalidade de desenvolvimento do modelo 01 foi determinar o pior rendimento do canavial para avaliar o desempenho do planejamento atual da colheita sem uma ferramenta de apoio. O resultado mostrou que o plano atual de colheita é 3,35% melhor que o pior resultado considerando os dados reais da última safra. O modelo 02 que representa o melhor aproveitamento, mostrou um desempenho de 2,3% melhor que o ocorrido na última safra. Já o modelo 03 permite se estabelecer uma estratégia de longo prazo para a substituição dos diferentes tipos de cana de açúcar. Esta substituição pode ser paulatina para considerar o fim da vida útil de uma gleba de plantio que tem duração de cinco anos.

Um acompanhamento efetivo dos dados relativos ao canavial toma grande importância para a análise de cenários. Fatores como chuva, solo, proximidade da usina e idade da cana na produtividade da área contribuem significativamente para o rendimento de um aproveitamento agrícola. Desenvolver uma matriz que contemple a influência destes

fatores em relação ao rendimento seria de extrema importância para um melhor planejamento de colheita e plantio.

O modelo matemático desenvolvido neste projeto considerou em sua análise duas bases de dados distintas. A primeira tomou todo o histórico de rendimento de cada cultivar ao longo do histórico da usina do qual foi extraído o rendimento médio. O segundo considerou os rendimentos dos cultivares observados na última safra. Neste sentido cresce a importância de motivar a usina para aprimorar a coleta e o armazenamento de dados que venham contribuir em estudos futuros com dados mais próximos da realidade.

O modelo propõe um plano futuro a partir de dados do passado. O ideal para utilização do modelo seria iniciá-lo e analisar o resultado diariamente. A rotina seria prever as variedades que serão colhidas, colher análises de maturação nas áreas, calcular os desvios e fazer ajustes das curvas. Assim o modelo seria sempre corrigido e teria um resultado muito próximo do real.

Durante todo o trabalho de desenvolvimento dos modelos e aprendizagem dos processos da cultura da cana-de-açúcar alguns questionamentos e possíveis sugestões de trabalhos futuros surgiram que serão apresentados abaixo.

A área da serra fica a uma distância média de 55 km da Usina. É uma área distante da usina. O custo de transporte de um caminhão nesta distância é alto. Toda cana colhida apresenta na parte inferior, em cerca de 30% de seu volume, 80% da quantidade de açúcar. Seria um trabalho muito interessante analisar a possibilidade de deixar este material orgânico na plantação, por ser um bom adubo, e transportar o material mais rico para a usina. Quantificar o custo de transporte deste pedaço de cana em comparação com o transporte de toda a cana e analisar se compensa levar somente este pedaço seria uma sugestão para trabalhos futuros. Esta análise deveria também considerar o aproveitamento da área por outro tipo de cultivar que não a cana de açúcar.

Outra sugestão de trabalho futuro seria referente à reforma do canavial. Existem dois tipos de plantio de cana-de-açúcar que são a cana de doze meses e cultivo em dezoito meses. O cultivo em doze meses pode ser feito de duas formas. Na primeira, a cana é

plantada de junho a agosto e colhida após 12 meses. Ela necessita de irrigação nos meses de plantio. Outra forma de plantar com doze meses seria plantar entre outubro e novembro e colher após 12 meses. Este caso não necessita de irrigação e as variedades plantadas são tardias.

O cultivo em dezoito meses se inicia com a plantação da cana entre janeiro e abril e posteriormente colhida entre abril e julho do ano seguinte que resultam em um período total de 15 a 18 meses. Geralmente estas áreas após o último corte são preparadas e utilizadas parte dela (50%) para rotação de cultura (amendoim /soja). O período que se inicia o rodízio de cultura é entre outubro e novembro sendo colhido entre janeiro e março pois a colheita dos cereais acontece de 120 a 150 dias após o plantio. Resta somente parte do mês de março e abril para fazer todo o plantio de cana e geralmente as usinas não tem estrutura para plantar toda a área neste curto período de tempo.

Geralmente a cana de dezoito meses apresenta um rendimento maior no primeiro corte e posteriormente no segundo, mas como os dois tipos de cultivo apresentam queda de rendimento ao passar dos anos de colheita, esta diferença tende a diminuir com o tempo. Existem estudos que mostram qual tipo de cultivo é ideal, mas seria interessante aliar este estudo ao preço do açúcar e do etanol para os próximos anos.

Desenvolver um modelo de programação num horizonte pré-estabelecido e contemplar possíveis áreas de reforma disponibilizando a estas os cultivos de dezoito ou doze meses é uma sugestão de trabalho futuro. O resultado poderia contemplar um misto de cultivos de doze e dezoito meses e a quantidade de áreas que deveriam receber reforma.

Destaca-se que todas estas alternativas poderiam ser avaliadas pelo modelo desenvolvido neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Marcellio De et al . Chave analítica para determinação de dez variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). *Scientia agrícola*, Piracicaba, v. 52, n. 1, 1995.

BAIO, Fábio Henrique Rojo et al . Modelo de programação linear para seleção de pulverizadores agrícolas de barras. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 2, 2004.

BELIK, W. & VIAN, C. E. F. Desregulamentação estatal e novas estratégias competitivas da agroindústria canavieira em São Paulo. *Agroindústria Canavieira no Brasil – Evolução, Desenvolvimento e Desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.

CAIXETA FILHO, José Vicente. *Pesquisa Operacional: Técnicas de Otimização Aplicadas a Sistemas Agroindustriais*. 2 ed. , São Paulo, Atlas, 2004.

CARVALHO, E. P. Potencial de mercado para etanol. In: *Seminário Combustíveis, Lubrificantes e Aditivos*. São Paulo, 2005. Disponível em: www.unica.com.br.

CERTO, Samuel C., PETER, James P. *Administração Estratégica: Planejamento e implantação da estratégia*. São Paulo. 2 ed., São Paulo, Pearson Brasil, 2005.

COPERSUCAR, *Fundamentos dos processos de fabricação de açúcar e álcool*, Caderno Copersucar, 1988.

FRIZZONE, José Antônio et al . Modelo de programação linear para otimizar o uso da água em projetos de irrigação: uma aplicação ao projeto Senador Nilo Coelho. *Scientia agrícola*, Piracicaba, v. 54, p.136-148, 1997.

GALVANI, Emerson et al. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 54, n. 1-2, 1997.

GIBBIN, Randal Victor. Modelos para escolha de cultivares em empreendimentos agrícolas de pequeno porte. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2005, Tese (mestrado).

LACHTERMACHER, Gerson. Pesquisa Operacional na tomada de decisões. 3 ed. , Rio de Janeiro, Campus, 2006.

LMC INTERNATIONAL. Consultoria especializada do setor. Web site: <<http://www.lmc.co.uk>> Acesso em: 13/05/2008.

LOVATELLI, C. Agronegócio e energia: a função da agricultura não é só produzir alimentos. Disponível em: <<http://www.abag.com.br>>. Acesso em: 17/05/2008.

MILANEZ, Artur Yabe; FILHO, Paulo de Sá C. Faveret; ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da. Perspectivas para o etanol brasileiro. Em: BNDES Setorial, Rio de Janeiro, março de 2008, n.27, p. 21-38.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias de. Indicadores do mercado de trabalho do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar do Brasil no período 1992-2005. Estudos Econômicos, São Paulo, v. 37, n. 4, 2007.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias de. O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. Revista da Economia Aplicada, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, 2007.

NEVES, Marcos Fava; CONEJERO, Marco Antonio. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. Revista da Economia Aplicada, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, 2007.

SHIKIDA, P.F.A. A Evolução Diferenciada da Agroindústria Canavieira no Brasil de 1975 a 1995. Cascavel: Edunioeste, 1998. 149p.

UNICA. Web site institucional. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 12/03/2009.

USINA SÃO MARTINHO. Web site institucional. Disponível em: <<http://www.usinasaomartinho.ind.br>>. Acesso em: 10/05/2008.