UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS

ALEXSANDRO SILVA SOLON

ANÁLISE MATEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE MODELO PARA ELEVAR O TEOR ALCOOLICO DE ETANOL DA CANA-DE-AÇÚCAR.

UBERLÂNDIA / MG
2017

ALEXSANDRO SILVA SOLON

ANÁLISE MATEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE MODELO PARA ELEVAR O TEOR ALCÓOLICO DE ETANOL DA CANA-DE-AÇÚCAR.

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência para obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis.

Área de concentração: Biomassas Energéticas.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Cezar Juliatti

Co-orientador: Prof. Dr. Kleber Ferreira Pinto

UBERLÂNDIA / MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S689a
2017

Solon, Alexsandro Silva, 1975-
Análise matemática para determinação de modelo para elevar o teor alcóolico de etanol da cana-de-açúcar / Alexsandro Silva Solon. - 2017.
93 f. : il.

Orientador: Fernando Cezar Juliatti.
Coorientador: Kleber Ferreira Pinto.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis.
Inclui bibliografia.

1. Biocombustíveis - Teses. 2. Biomassa - Teses. 3. Cana-de-açúcar - Teses. 4. Álcool - Teses. I. Juliatti, Fernando Cezar, 1957- II. Pinto, Kleber Ferreira. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis. IV. Título.

CDU: 662.756

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS

Ata da defesa de TESE DE DOUTORADO junto ao Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis, do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia

DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM BIOCOMBUSTÍVEIS, NÚMERO 02/PPBIC.

DATA: 10/02/2017

DISCENTE: Alexsandro Silva Solon **MATRÍCULA:** 11313PGB001

TÍTULO DO TRABALHO: Análise matemática para determinação de modelo para elevar o teor alcoólico de etanol de cana de açúcar

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Biocombustíveis

LINHA DE PESQUISA: Manejo integrado de doenças e produção de culturas energéticas

PROJETO DE PESQUISA DE VINCULAÇÃO: Produção e sustentabilidade de culturas para fins energéticos - Produção de Etanol

Às nove horas do dia dez de fevereiro do ano dois mil e dezessete, no Auditório Prof. Dr. Manuel Hernández-Terrones do Bloco 5I, no Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Doutores Fernando de Araújo e Reginaldo de Camargo, da Universidade Federal de Uberlândia, José Carlos Nunes Barreto, do CEFET-SP, Gustavo Otero Prado, da Universidade Federal de Triângulo Mineiro, e Fernando Cezar Juliatti, professor orientador e presidente da mesa. professor(a) orientador(a) e presidente da mesa. Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa apresentou o(a) candidato(a) e a Banca Examinadora, agradeceu a presença do público e discorreu sobre as normas e critérios para a realização desta sessão, baseadas no Regulamento do Programa PPBIC. Em seguida, o(a) presidente da mesa concedeu a palavra ao(à) candidato(a) para a exposição do seu trabalho e, em sequência, aos examinadores, em ordem sucessiva, para arguir o(a) apresentador(a). A duração da apresentação e o tempo de arguição e resposta deram-se conforme as normas do Programa. Ultimada a arguição, desenvolvida dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais e A provou o(a) candidato(a). Por sugestão da Banca Examinadora, o título do trabalho será MODELO MATEMÁTICO PARA ELEVAR O TEOR ALCOÓLICO DE ETANOL DA CANA-DE-AÇUCAR COM O SOFTWARE GAMS

Esta defesa de Tese de Doutorado é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento do estabelecido nas normas do Programa, legislação e regulamentação internas da UFU. As correções observadas pelos examinadores deverão ser realizadas no prazo máximo de 30 dias. Nada mais havendo a tratar, deu-se por encerrada a sessão às 12 horas e 15 minutos e lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pela Banca Examinadora.

Prof. Dr. Fernando de Araújo – UFU

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo – UFU

Prof. Dr. Gustavo Otero Prado – UFTM

Prof. Dr. José Carlos Nunes Barreto – CEFET-SP

Orientador : Prof. Dr. Fernando Cezar Juliatti – UFU

Dedico este trabalho a minha mãe Elza, minha esposa Eva, e meus filhos Henrique e Guilherme, fonte inesgotável de carinho, compreensão e amor, minha fortaleza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela oportunidade de alcançar mais este objetivo.
Agradeço a todos os meus amigos e família, pela força e paciência durante todo este período.
Agradeço, em especial, à minha esposa Eva e meus filhos Henrique e Guilherme, pelo apoio incondicional e paciência durante esse trabalho.
Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Cezar Juliatti, pela oportunidade de desenvolver este projeto em seu grupo de pesquisa, confiança em mim depositada, orientação, paciência, dedicação, empenho, respeito e principalmente pela amizade ao longo destes anos. Como também agradeço ao Prof. Dr. Kleber Ferreira Pinto por ter aceitado ser meu co-orientador nesse projeto e por ter dedicado seu tempo e confiança no desenvolvimento da modelagem matemática e uso do GAMS.
Aos meus colegas do programa de Biocombustível da Universidade Federal de Uberlândia, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho, em especial ao amigo Fernando de Araújo.
Gostaria de agradecer aos professores e Coordenadores do Programa da Pós-Graduação Dr. Reinaldo Ruggiero, Dr. Daniel Pasquini e Dr. Alexandre Soares, assim como os docentes do IQUFU, ICIAG e do Programa de Pós-Graduação em biocombustíveis.
Ao IQUFU, ICIAG e Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.
À FAPEMIG, CNPQ e a CAPES, pelo apoio financeiro.

“A ciência consiste em substituir o saber que parecia seguro por uma teoria, ou seja, por algo problemático”.

José Ortega y Gasset

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1 PRODUÇÃO DE ETANOL 18
2.1.1 CANA-DE-AÇÚCAR 19
2.2 SISTEMA SUCROALCOOLEIRO BRASILEIRO 29
2.2.1 RECEPÇÃO, PREPARO E EXTRAÇÃO DO CALDO 30
2.2.2 SISTEMA DE MOENDAS 33
2.2.3 TORTA DE FILTRO 36
2.2.4 PROCESSO DE FERMENTAÇÃO 37
2.2.5 PROCESSO DE DESTILAÇÃO E DESIDRATAÇÃO 39
2.2.6 PROCESSO DE OBTENÇÃO DE ETANOL HIDRATADO 40
2.2.7 PROCESSO DE EVAPORAÇÃO 41
2.2.8 PROCESSO DE CENTRIFUGAÇÃO 42
2.3 UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS QUANTITATIVOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA 43
2.3.1 PESQUISA OPERACIONAL 45
2.3.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR 48
2.3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA 49
2.3.4 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO 51
2.4 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO 51
3 MATERIAL E METODOS 55
3.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA 55
3.2 ELABORAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO 56
3.2.1 ÍNDICES DO MODELO MATEMÁTICO 57
3.2.2 PARÂMETROS DO MODELO MATEMÁTICO 58
3.2.3 FUNÇÃO OBJETIVO E VARIÁVEIS DE DECISÃO DO MODELO MATEMÁTICO 59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 61
4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE 3 USINAS AMOSTRADAS 61
4.2 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROBLEMA 63
4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS 64
4.4 CORRELAÇÃO ESTATÍSTICA MULTIVARIADA 71
4.5 SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO 76

4.6 DISCUSSÃO 77
5 CONCLUSÕES 79
REFERÊNCIAS 80

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL 17
FIGURA 2: PRODUÇÃO DE ETANOL POR REGIÃO 19
FIGURA3: LOCALIZAÇÃO DAS USINAS DE AÇÚCAR E BIOETANOL NO BRASIL. 21
FIGURA 4: FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR, ÁLCOOL E MELAÇO. 29
FIGURA 5: ESQUEMA DO PROCESSO NA USINA DE CANA-DE-AÇÚCAR 30
FIGURA6: PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO CALDO 34
FIGURA7: DESCRIÇÃO BÁSICA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DO CALDO 35
FIGURA8: PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TORTA DE FILTRO 37
FIGURA9: PROCESSO DE FERMENTAÇÃO 38
FIGURA10: PROCESSO DE DESTILAÇÃO DE DESIDRATAÇÃO COM CICLOHEXANO 39
FIGURA11: PROCESSO DE EVAPORAÇÃO DO CALDO 41
FIGURA12: PROCESSO DE EVAPORAÇÃO DO CALDO 43
FIGURA13: MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO 50
FIGURA14: GRÁFICO DA RELAÇÃO DA TENDÊNCIA DA VARIÁVEL UMIDADE (IRRIGADO E/OU CHUVA) COM O TEOR ALCOÓLICO OBTIDO NO MOSTO PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA 68
FIGURA15: GRÁFICO DA RELAÇÃO DA TENDÊNCIA DA VARIÁVEL ADUBAÇÃO DO SOLO COM O TEOR ALCOÓLICO OBTIDO NO MOSTO PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA 68
FIGURA16: GRÁFICO DA RELAÇÃO DA TENDÊNCIA DA VARIÁVEL PLANTIO DIRETO COM O TEOR ALCOÓLICO OBTIDO NO MOSTO PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA 69
FIGURA17: GRÁFICO DA RELAÇÃO DA TENDÊNCIA DA VARIÁVEL CALAGEM (COM USO DE CALCÁRIO 85/100) COM O TEOR ALCOÓLICO OBTIDO NO MOSTO PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA. 69
FIGURA18: GRÁFICO DA RELAÇÃO DA TENDÊNCIA DA VARIÁVEL COLHEITA MECANIZADA COM O TEOR ALCOÓLICO OBTIDO NO MOSTO PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA. 70
FIGURA19: GRÁFICO DA RELAÇÃO DA TENDÊNCIA DA VARIÁVEL MATURADORES QUÍMICOS COM O TEOR ALCOÓLICO OBTIDO NO MOSTO PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA. 70
FIGURA 20: PREPARAÇÃO DAS VARIÁVEIS 71
FIGURA 21: TABULAÇÃO DAS VARIÁVEIS 72
FIGURA 22: BIPLOT DO SPSS 75

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA1: PARTICIPAÇÃO DA CANA EM RELAÇÃO À OUTRAS PLANTAS CULTIVADAS NO BRASIL. 22
TABELA2: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE CANA, AÇÚCAR E ETANOL. 23
QUADRO 1: ESPÉCIES DE CANA-DE-AÇÚCAR 28
TABELA3: DADOS DO PROCESSO DE PLANTAÇÃO E COLHEITA DA CANA 61
TABELA4: DADOS OBTIDOS NO LABORATÓRIO PCTS DAS USINAS 62
TABELA5: DADOS OBTIDOS NO LABORATÓRIO PCTS DAS USINAS - CONTINUAÇÃO 62
TABELA6: RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS COM O TEOR ALCOÓLICO EM %/BRIX PARA UMA TONELADA DE CANA PROCESSADA 65
TABELA7: SAÍDA DE RESULTADOS DO SOFTWARE GAMS DA CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS. 72

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 37
EQUAÇÃO 2 64
EQUAÇÃO 3 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATR – Açúcares total recuperáveis
BC – Bagaço de Cana-de-Açúcar
BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
CTC – Centro de Tecnologia Canavieira
DIN – *DeutschesInstitutfürNormung*
EUA – Estudos Unidos da América
FTIR – Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO – *International Organization for Standardization*
KBr – Brometo de potássio
LSPA – Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
NBR – Norma Brasileira
NIPE – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético
P – Pressão Atmosférica
PC – Palha da Cana-de-Açúcar
PDI – Pesquisa, desenvolvimento e inovação
PSI – Libra força por polegada quadrada
TEC – Tarifa externa comum
tep – tonelada equivalente de petróleo
TT – Transferência de tecnologia
UFU – Universidade Federal de Uberlândia
UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar

RESUMO

Neste trabalho foi apresentado como pode se obter o melhor rendimento e a maximização do teor alcoólico do etanol da cana-de-açúcar através de modelagem matemática. Para isso, foi feito um estudo e coleta de dados envolvendo três usinas delimitadas na região que corresponde o Noroeste de São Paulo e o Triângulo Mineiro. Assim os principais produtores de cana-de-açúcar fornecedores dessas usinas foram visitados durante o período de dois anos e meio, e, foi elaborada uma planilha contendo todos os dados de campo e laboratoriais resultantes desse trabalho *in loco*. Logo, as variáveis foram tratadas estatisticamente quanto a sua linearidade ou não-linearidade para definição do comportamento. Além disso, as correlações multivaridas também foram investigadas através do software IBM SPSS Statistics. Dessa forma, as variáveis foram selecionadas de acordo com sua força de atração e determinadas para serem utilizadas no modelo matemático com o objetivo de elevar o rendimento do etanol em litros por tonelada de cana-de-açúcar processada. Posteriormente, o modelo foi definido como de Programação Linear, com variáveis inteiras, binárias e contínuas. Assim, o modelo foi estruturado seguindo os passos para desenvolvimento e solução do modelo de Pesquisa Operacional. Finalmento o modelo gerado no software GAMS foi testado nas usinas e validado, chegando ao resultado final de 93 litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar processada, o que corresponde com a realidade das Usinas brasileiras.

Palavras-chaves: Biomassas, Cana-de-Açúcar, Etanol, Modelo Matemático, Programação Linear, Gams.

ABSTRACT

In this work it was presented how to obtain the best result and the maximization of the ethanol content of sugarcane through mathematical modeling. For this, a study and data collection was carried out involving three plants delimited in the region corresponding to the Northwest of São Paulo and the Triângulo Mineiro. Thus, the main producers of sugarcane suppliers from these plants were visited during the two and a half year period, and a spreadsheet containing all the field and laboratory data resulting from this work in loco was elaborated. Therefore, the variables were treated statistically for their linearity or non-linearity to define the behavior. In addition, multivariate correlations were also investigated using the IBM SPSS Statistics software. In this way, the variables were selected according to their attraction force and determined to be used in the mathematical model with the objective of increasing the ethanol yield in liters per ton of processed sugarcane. Subsequently, the model was defined as Linear Programming with integer, binary and continuous variables. Thus, the model was structured following the steps for development and solution of the Operational Research model. Finally the model generated in the GAMS software was tested in the mills and validated, reaching the final result of 93 liters of ethanol per ton of processed sugarcane, which corresponds to the reality of the mills using the same parameters.

Keywords: Biomass, Sugarcane, Ethanol, Mathematical Model, Linear Programming, Gams.

1 INTRODUÇÃO

Devido à grave crise mundial do petróleo, surgiu a necessidade de se obter novas fontes de energia renovável. Além disso, logo após a crise do petróleo houve a crise do açúcar no mercado mundial, o que fez com que a cana-de-açúcar torna-se uma alternativa energética viável.

Em dados pesquisados na ANP (2015), o Brasil estava entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo, com uma produção anual, em 2014, de 3,3 bilhões de litros e uma capacidade nominal acumulada autorizada pela ANP, no mesmo ano, de 7,8 bilhões de litros.

O Brasil é um extenso país e, se continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento, pode realizar as previsões mundiais e se consolidar como uma das grandes economias deste século.

As fontes energéticas renováveis como a água, o vento e a madeira, até o século XVIII, foram gradualmente substituídas por recursos não renováveis como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral. Este notório fato é recentemente associado a mudanças climáticas que são reflexo de um sistema insustentável, baseado no consumo exacerbado de combustíveis fósseis. Como a demanda energética é irreversível, as substituições destas matéria-primas para padrões renováveis, além da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, tornaram-se medidas plausíveis a curto, médio, e longo prazo.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (BEN 2015, ano base 2014), a matriz energética brasileira representa 272,63 milhões de tonelada equivalente de petróleo (tep), ou seja, 3,7% da energia mundial. Do total, 42,80% correspondem ao petróleo e derivados; 27,12% à biomassa; 11,78% à hidráulica e à eletricidade; 11,61% ao gás natural; 1,12% ao carvão mineral; 0,25% ao urânio. O Brasil possui 43,54% de sua matriz de energia renovável, um verdadeiro contraste com o restante do mundo que apresenta em média apenas 13,8%. A energia de biomassa tem uma contribuição importante nesse processo, podendo ser dividida em: lenha (20,83%); biomassa da agroindústria da cana-de-açúcar (41,47%) e outros (10,65%).

A biomassa produzida no ciclo produtivo é uma das formas mais primitivas de energia, sendo até hoje utilizada pelo homem. No entanto, a energia biomássica moderna apresenta uma nova possibilidade com um uso mais eficiente, além da queima direta.

No presente trabalho será desenvolvido um estudo teórico e prático sobre o processo de industrialização da cana-de-açúcar, seus produtos e coprodutos, e a ênfase na obtenção do Etanol e o seu teor de álcool. E, em seguida será feito um levantamento de todas as variáveis desse sistema e a identificação das variáveis para a elaboração do modelo matemático e, posteriormente das respectivas simulações.

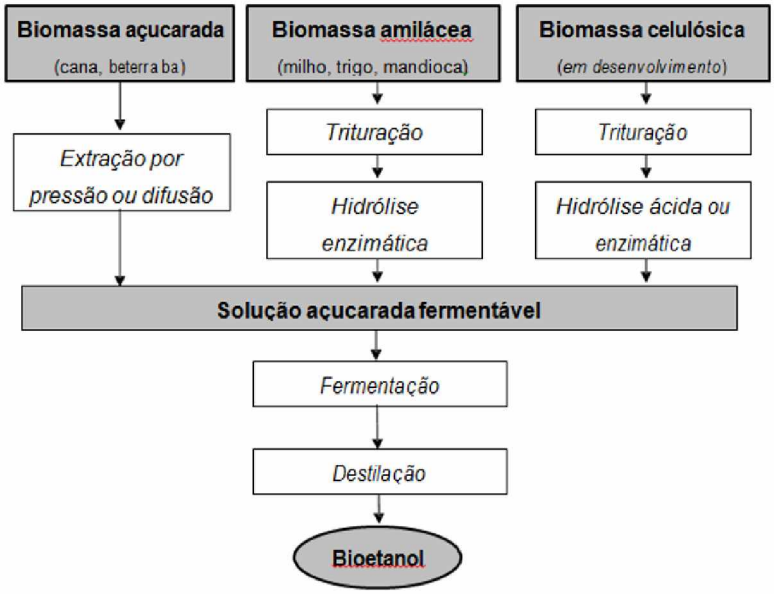
Como objetivo geral será a construção de um modelo matemático, com a utilização de um software de simulação matemática e pesquisa operacional GAMS, determinar a combinação de variáveis que obtenham a melhor relação de desempenho entre quantidade de cana-de-açúcar plantada (em kg) e o teor alcoólico (em %) obtido pelo mosto no início do processo da usina.

Este trabalho faz parte da área de concentração de Biomassas Energéticas do Programa de Doutorado em Biocombustíveis da Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. O objeto de estudo, no caso, está dentro de uma rota tecnológica de produção de bioetanol.

A produção de bioetanol é efetuada em bases comerciais por duas rotas tecnológicas, utilizando matérias-primas doces, diretamente fermentáveis, como a cana-de-açúcar e a beterraba açucareira, ou matérias-primas amiláceas, como o milho e o trigo, cujo amido deve ser convertido em açúcares (sacarificado) antes da fermentação, como esquematizado na Figura 1.

Uma terceira rota ainda em desenvolvimento, utiliza a biomassa disponível em materiais como o bagaço e a palha, hidrolisa as cadeias celulósicas e produz uma solução fermentável de açúcares, apresentando grande interesse graças ao baixo custo da matéria-prima.

Figura 1: Rotas tecnológicas para produção de etanol



Fonte: Embrapa (2015)

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Estima-se que aproximadamente 430 usinas estejam em operação no país, e a modernização ocorre tanto na adoção de novas tecnologias utilizadas desde o plantio do cultivar até a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade.

As pesquisas estão se concentrado no desenvolvimento de novos insumos básicos, novos cultivares de caráter renovável, sua relação com a produtividade para a produção de combustíveis que possam substituir os derivados de petróleo, o que coloca a biomassa em um papel de destaque, em razão da sua natureza renovável, ampla disponibilidade, biodegradabilidade e baixo custo.

Uma das formas de pesquisa que devem ser utilizadas são as técnicas de programação linear – em que as alternativas de aumento da produção em diferentes cenários climáticos e diferentes cultivares são comparadas e testadas por recursos matemáticos e computacionais –, um modelo matemático poderia possibilitar e planejar o manejo da lavoura para atingir os objetivos de produção, mantendo os mesmos parâmetros de variedade de cana e maturadores utilizados na safra anterior, bem como as condições climáticas inerentes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PRODUÇÃO DE ETANOL

As usinas produtoras de etanol apresentam tecnologia de produção muito semelhante quanto ao processamento, diferenciando-se pelo tipo de equipamento, controle operacional e gerenciamento. O etanol pode ser obtido de diferentes matérias-primas, no entanto, as culturas da cana-de-açúcar e do sorgo sacarino possuem açúcares fermentessíveis. O que contribui para a simplificação do processo, apresentando menor custo de produção e maior eficiência energética, quando comparadas a fontes amiláceas como milho, mandioca e batata-doce (CONSECANA, 2006).

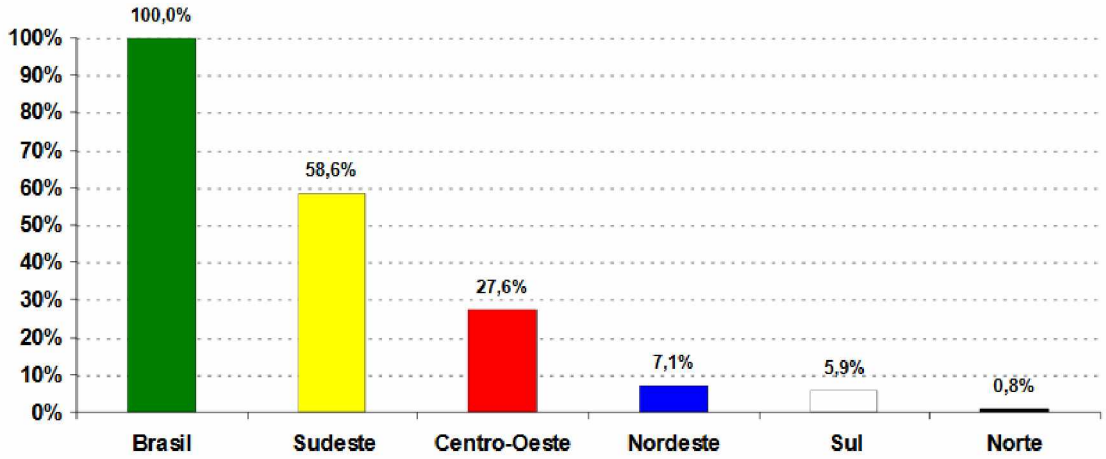
A cadeia produtiva do açúcar/etanol pode ser resumida em: plantio, colheita, acondicionamento, moagem e extração, fermentação e destilação. A cana recebida é amostrada aleatoriamente para aferir qualidade e para cálculo de pagamento. Existem basicamente dois possíveis critérios para pagamento de cana, um baseado no peso do colmo e outro baseado no peso de açúcares. Atualmente, o pagamento é baseado em quilograma de Açúcares Total Recuperáveis (ATR) (CONSECANA, 2006), desta forma, o preço da cana é formado por quilogramas de ATR por tonelada (Kg ATR/tonelada de cana), levando em consideração a sacarose e os açúcares redutores, como glicose e frutose, que servem para a produção de etanol.

Durante o processo produtivo, a matéria-prima recebida na indústria passa por um processo de limpeza, que pode ser por lavagem ou limpeza a seco. Em seguida, a cana é destinada a equipamentos de preparo para extração do caldo. O sistema pode possuir conjunto de facas rotativas e desfibrilador e a extração pode ser feita por moagem ou difusão (CONSECANA, 2006).

A fermentação é a fase onde os açúcares fermentessíveis são transformados em álcool. As reações ocorrem nas dornas de fermentação, ocorre a mistura na proporção de 2:1, do caldo (mosto) e do fermento biológico (pé-de-cuba), respectivamente. Durante a reação, ocorre liberação de gás carbônico e formação de produtos secundários, como álcoois superiores, glicerol e aldeídos. Ao término da fermentação, de 4 a 12 horas em média, o teor médio de álcool na dorna é de 7% a 10% e a mistura recebe o nome de vinho fermentado. O vinho é então centrifugado

para recuperação do fermento, chamado de leite de levedura, que retorna à cuba para um novo ciclo. E a fase menos densa da centrifugação é enviada para as colunas de destilação para a recuperação do etanol presente no vinho (MOREIRA, 2011). Na Figura 2 tem-se a produção de etanol por região, no Brasil.

Figura 2: Produção de Etanol por Região



Fonte: CONAB (2015).

2.1.1 CANA-DE-AÇÚCAR

Cultura originária do sudeste da Ásia, a exploração canavieira teve início, em épocas remotas e fundamentou-se sobre a espécie *S. officinarum*. Devido ao surgimento de inúmeras doenças e pragas, e de posse de uma tecnologia mais avançada, conseguiu-se chegar a novas variedades, as quais foram obtidas pelo cruzamento da *S. officinarum* com as outras quatro espécies do gênero *Saccharum* e, posteriormente, através de recruzamentos com as ascendentes (Embrapa, 2015).

Segundo a Empraba (2015), os trabalhos de melhoramento genético persistem até os dias atuais, os melhoramentos genéticos são uma mistura das cinco espécies originais e a existência de cultivars ou variedades híbridas.

A importância da cana-de-açúcar pode ser atribuída à sua gama de aplicações rentáveis, podendo ser empregada *in natura*, sob a forma de forragem, para alimentação animal, ou como matéria prima para a fabricação de rapadura, melado, aguardente, açúcar e álcool e, ainda a utilização de seus subprodutos como na queima da biomassa para a geração de eletricidade (Embrapa, 2015).

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, desta forma, o correto plantio e manejo do canavial são necessárias para conseguir uma boa produtividade, tanto na cana-planta (primeiro corte), como nas soqueiras (cortes subsequentes). O sucesso na produção depende de diversos fatores, sendo a cultivar a tecnologia mais importante e de menor custo para o produtor. Barbosa *et al.* (2007) apontam como características desejáveis nas variedades de cana-de- açúcar: produtividade elevada, elevado teor de sacarose, interação variedade x maturador, corte eficiente, boa brotação e longevidade da soca, perfilhamento e características do colmo, não florescimento excessivo, tolerância a principais doenças e pragas.

A utilização da queima do canavial como parte do processo de colheita da cana-de- açúcar tende a ser eliminada, por motivos ambientais e de saúde pública. Como aconteceu no Estado São Paulo a proibição através do Decreto Estadual nº 42.056, que determina a eliminação total da queima até 2020. Desta forma, a mecanização total ou parcial apresenta-se como a única opção possível para que a colheita da cana atenda simultaneamente os requisitos ergonômicos, a viabilidade econômica do setor e, principalmente, as exigências legais e ambientais (BRAUNBECK e OLIVEIRA, 2006). Além disso, essa técnica contribui para o acúmulo de matéria orgânica no solo e consequente sumidouro de CO_2 estufa.

As tecnologias atuais possibilitam produtividade em torno de 83 toneladas de cana-de- açúcar por hectare (CTC, 2014), e aproximadamente 7000 litros de álcool por hectare, devido aos grandes avanços nos últimos 30 anos. Notoriamente apenas se faz menção à cultura da cana-de-açúcar, devido ao avançado estágio de desenvolvimento e difusão tecnológica, além de sua já reconhecida potencialidade (MARCHIORI, 2004).

Braskem (2015), destaca o Brasil como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e afirma que ela é um exemplo de cultura renovável e versátil, que pode ser utilizada como fonte de energia limpa e matéria-prima de produtos. Ainda segundo a Braskem (2015), a modernização de aproximadamente 430 usinas em operação no país, operam com a adoção de novas tecnologias desde o plantio até a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade, fortaleceram o setor, reconhecido mundialmente por seu pioneirismo e sua eficiência produtiva.

Segundo a UNICA (União da Indústria da Cana-de-açúcar, safra 2015/2016), o Brasil foi responsável por 633,927 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Cerca

de 90% da produção brasileira de cana-de-açúcar é colhida na região Centro-Sul, principalmente no Estado de São Paulo que é responsável por 53,16%.

De acordo com Nova Cana (2015), o Brasil apresenta dois períodos distintos de safra: de setembro a março no Norte-Nordeste, e de abril a novembro no Centro-Sul. Assim, o país produz etanol durante praticamente o ano todo. Ainda para Nova Cana (2015), as melhores destilarias produzem aproximadamente 85 litros de etanol anidro por tonelada de cana. O restante das usinas têm uma produção em torno de 71 kg de açúcar e 42 litros de etanol para cada tonelada de cana processada. Em 2015 o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e o Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) apresentou a localização das usinas do país, conforme ilustra a Figura 3, com nítida concentração na Zona da Mata, região Nordeste, estado de São Paulo e região Sudeste.

Figura3: Localização das usinas de açúcar e bioetanol no Brasil.



Fonte: CTC (2015).

Nova Cana (2015), menciona que em geral, as áreas cultiváveis da cana-de-açúcar localizam-se num raio de 45 km das usinas, em média, por motivos relacionados ao custo do transporte. O estado de São Paulo, produz próximo de 52% (4678,7 mil hectares) de toda a cana, açúcar e etanol do país. O segundo maior produtor é o estado do Goiás, com 10,1% (908 mil hectares) da cana moída no Brasil.

Segundo Nova Cana (2015), no Brasil, a cana-de-açúcar é a terceira cultura renovável em termos de ocupação de área, bem atrás da soja e de milho, como pode ser visto na Tabela 1**,** devido, em particular, à excelente eficiência de conversão fotossintética da cana, que permite uma produtividade excepcional, em torno de 85 t/ha em média.

Tabela1: Participação da cana em relação à outras plantas cultivadas no Brasil.

Culturas	**Area cultivada em milhões de hectares**
Soja	20,58
Milho	13,82
Cana-de-açúcar	6,69
Feijão	3,83
Arroz	2,90
Café	2,22
Mandioca	1,91
Trigo	1,85
Algodão herbáceo	1,12
Laranja	0,80
Outros	2,06

Fonte: NOVACANA (2014)

A tabela 1 apresenta um comparativo entre as culturas cultivadas no Brasil com a cana-de-açúcar, o que pode-se perceber que em termos de área colhida a cana fica muito longe das outras culturas principais como a soja e o milho, mas quando o índice de comparação é a produção, o cenário muda totalmente favorável à cana.

Nova Cana (2015), relata que a produção de cana no Brasil cresceu de forma significante após a criação do Proálcool, novembro de 1975, passando de pouco menos de 100 milhões de toneladas por ano para um novo patamar em torno de 220 milhões de toneladas por ano, em 1986/87. Após um período de estagnação, o cultivo da cana-de-açúcar só voltou a crescer na safra 93/94, motivado pelo aumento das exportações de açúcar. A partir deste período o crescimento da produção tem ocorrido

de forma contínua (com exceção do período entre 1998 a 2001, quando houve uma queda gerada pela crise no setor). Com o avento dos veículos *flex fuel*, lançados no mercado nacional em 2003, a produção de cana-de-açúcar voltou a ter um crescimento acelerado, para atender ao aumento da demanda de álcool hidratado, se aproximando de 520 milhões de toneladas em 2007. A tabela2 ilustra a evolução brasileira da produção de cana, açúcar e etanol.

Tabela2: Evolução da produção brasileira de cana, açúcar e etanol.

Safra	Cana moída em toneladas		
	Própria	Fornecedores	Total
2003/04	228.428.646	128.682.237	357.110.883
2004/05	230.724.931	150.722.171	381.447.102
2005/06	232.462.389	150.019.613	382.482.002
2006/07	260.690.582	168.126.339	428.816.921
2007/08	284.567.712	211.275.480	495.843.192
2008/09	317.180.234	255.558.255	572.738.489
2009/10	343.500.907	259.555.460	603.056.367
2010/11	373.245.614	251.255.555	624.501.169
2011/12	333.324.567	227.669.223	560.993.790
2012/13	349.402.579	239.834.439	589.237.018
2013/14	379.871.053	279.486.136	659.357.189

Fonte: Mapa (2015)

Na Tabela 2 está claro que o total de cana moída em toneladas aumentou significativamente em 10 anos (54%), principalmente na região que compreende o centro-oeste e sudeste (Norte de São Paulo, Triângulo Mineiro, Sul e Sudeste de Goiás) como foi mostrado na Figura3. O que auxiliou também esse aumento, foi o incentivo governamental e o Pré-Sal.

A produtividade e a qualidade do caldo de cana-de-açúcar são profundamente influenciadas pelas condições climáticas prevalecentes durante os vários subperíodos do crescimento do cultivo, bem como do tipo de cultivar utilizado. .(http://www.sugarcanecrops.com/p/climate/, 2015).

A recoberta do açúcar é maior quando o clima é seco com baixa umidade; altas horas de radiação solar, noites frescas com variações diurnas frescas e muito pouca chuva durante o período de amadurecimento. Essas condições favorecem o acúmulo alto de açúcar.(http://www.sugarcanecrops.com/p/climate/, 2015).

A cana-de-açúcar depende de vários fatores diretos e indiretos na sua produção agrícola para elevar sua produtividade e/ou aumentar o rendimento de etanol. Esses fatores estão descritos a seguir:

- **Clima:** A cana-de-açúcar é cultivada numa área territorial extensa, a qual é compreendida entre a faixa dos paralelos 35º de latitude Norte e Sul do Equador, apresentando melhor comportamento nas regiões quentes. (Embrapa, 2015). É considerada essencialmente como uma planta tropical. Esse é um cultivo de longa duração e, portanto, convive com todas as estações, chuvosa, inverno e verão durante seu ciclo de vida. As principais características climáticas que controlam e favorecem seu crescimento, produção e qualidade da cana são temperatura, luz e umidade disponível. A planta vive melhor em áreas ensolaradas, quentes e tropicais;
- **Solo:** O Solo adequado é um meio para o crescimento correto da planta. Proporciona nutrientes, água e ancoradouro para plantas em crescimento. Manutenção de condições próprias físicas, químicas e biológicas do solo é necessário para realizar um crescimento maior, produção e qualidade da cana-de-açúcar. Cana-de-açúcar não requer nenhum tipo específico de solo e, portanto, pode ser cultivada em tipos de solo diversos variando de solos arenosos, argilosos e argilosos pesados, (Embrapa, 2015) desde que forneçam os nutrientes necessários ao cultivar;
- **Cultivar:** Um dos pontos que merece especial atenção do agricultor é a escolha geradora do cultivar para plantio. Isso não só pela sua importância econômica, como de massa verde e riqueza em açúcar, mas também pelo seu processo dinâmico, pois anualmente surgem novas variedades, sempre com melhorias tecnológicas quando comparadas com aquelas que estão sendo cultivadas. Dentre as várias maneiras para classificação dos cultivars de cana, a mais prática é quanto à época da colheita. Quando apresentarem longo Período de Utilização Industrial (PUI), a indicação de alguns cultivares ocorrerá para mais de uma época. (Oliveira, 2015). O Quadro 1 mostra a relação das principais características com as variedades de cana-de-açúcar. Atualmente os cultivares mais indicados para São Paulo e Estados limítrofes são:
    - Para início de safra: SP80-3250, SP80-1842, RB76-5418, RB83-5486, RB85-5453 e RB83-5054
    - Para meio de safra: SP79-1011, SP80-1816, RB85-5113 e RB85-5536

- Para fim de safra: SP79-1011, SP79-2313, SP79-6192, RB72-454, RB78-5148, RB80-6043 e RB84-5257
- Os cultivares SP79-2313, RB72-454, RB78-5148, RB80-6043 e RB83-5486 caracterizam-se pela baixa exigência em fertilidade de solo.

- **Plantio:** O sistema convencional de preparo do solo envolve operações de subsolagem e aração, combinadas por gradagens para a eliminação das soqueiras e incorporação de corretivos de solo. O tráfego intenso de colhedoras e veículos de transporte são normalmente os agentes compactadores que justificam o uso da subsolagem e das gradagens. Desse modo, um ciclo vicioso de compactação e descompactação se repete ao longo do tempo, sendo que ambas as operações, tanto de compactação quanto de descompactação, demandam equipamentos, combustíveis, mão de obra e investimentos para serem realizadas. Estima-se que a perda de solo para outras culturas, decorrente do preparo convencional, pode atingir 50 toneladas por hectare ao ano. Na cultura da cana-de-açúcar, ainda é pequena a utilização do Sistema de Plantio Direto, contudo, resultados preliminares mostram tendências similares a outras culturas. As técnicas de plantio direto e cultivo mínimo, quando possíveis e indicadas, aumentam a contribuição da cultura da cana-de-açúcar na questão ambiental, por reduzirem perdas de carbono para a atmosfera, fazendo com que o carbono que foi "drenado" da atmosfera pela cana, durante a fotossíntese, fique estocado no compartimento do solo. Tais técnicas contribuem, também, para aumentar esse estoque, a não queimada das folhas de cana antes da colheita e a manutenção da palhada no campo. (Novacana, 2015);
- **Calagem:** Os principais objetivos da calagem são eliminar a acidez do solo e fornecer suprimento de cálcio e magnésio para as plantas. O cálcio estimula o crescimento das raízes e, portanto, com a calagem ocorre o aumento do sistema radicular e uma maior exploração da água e dos nutrientes do solo, auxiliando a planta na tolerância à seca. A calagem ainda tem outros benefícios, como aumentar a disponibilidade de fósforo, já que diminui os sítios de fixação no solo, diminuir a disponibilidade de alumínio e manganês através da formação de hidróxidos, que não são absorvidos, aumentar a mineralização da matéria orgânica com consequente maior disponibilidade de nutrientes e favorecer a fixação biológica de nitrogênio. Nas propriedades físicas do solo, a

calagem aumenta a agregação, pois o cálcio é um cátion floculante e, com isso, diminui a compactação (Novacana, 2015);

- **Adubação:** A cana-de-açúcar apresenta sistema radicular diferenciado de outras culturas, uma vez que, não havendo impedimentos físicos ou químicos, atinge camadas profundas do solo. Facilitar o crescimento das raízes em profundidade contribui para o aumento da produtividade da cultura, já que aumenta o volume de solo explorado para a retirada de água e nutrientes. O uso de corretivos é fundamental para a melhoria da fertilidade do solo e dos ambientes de produção para a cana-de-açúcar. Considera-se como práticas corretivas o uso do calcário para corrigir a acidez, o uso do gesso para diminuir a atividade do alumínio e acrescentar cálcio em profundidade, e a fosfatagem, que adiciona fósforo em área total para aumentar o teor de fósforo em solos muito pobres deste elemento. A correção da acidez do solo tem efeitos diretos e indiretos sobre as plantas, alterando características do solo, como:
    - A neutralização do alumínio e do manganês, que podem ser tóxicos para as plantas;
    - A elevação das concentrações de cálcio e magnésio;
    - A elevação do pH;
    - O aumento na disponibilidade de uma série de elementos, como o fósforo, por exemplo. (Novacana, 2015);
- **Maturação:** Maturadores são produtos químicos que induzem o amadurecimento de plantas, causando, assim, a translocação e o armazenamento dos açúcares na planta. São utilizados para antecipar e otimizar o planejamento da colheita. Os maturadores podem, ainda, apresentar substâncias que dessecam a planta, o que favorece a queima e diminui as impurezas vegetais ou que inibem o florescimento (EMBRAPA, 2015). Existem dois tipos básicos de maturadores para o setor canavieiro: os estressantes e os não-estressantes. Os estressantes são inibidores de crescimento, que reduzem, acentuadamente, o ritmo de crescimento da cana, fazendo-a acumular a sacarose em vez de utilizá-la como fonte de energia para seu crescimento. A redução no ritmo de crescimento força a planta a amadurecer. Os maturadores estressantes mais utilizados são à base dos seguintes compostos: *Glyplhosate*, *EtilTrinexapac* e *Sulfometurom Metil*.Os maturadores não-estressantes não diminuem o ritmo de crescimento da planta e sua ação

libera o etileno, composto responsável pela maturação que ajuda a acumular sacarose nos colmos da cana. O Ethephon é um exemplo deste tipo de maturador (EMBRAPA, 2015);

- **Colheita:** A colheita e o transporte da cana-de-açúcar podem comprometer, significativamente, a qualidade do produto final e os cortes subsequentes. Por essa razão, tais atividades devem ser executadas de acordo com orientações técnicas precisas. Em relação a seleção e operacionalidade de um sistema de colheita, especificamente para a cana-de-açúcar, a análise não deve limitar-se apenas a aspectos referentes à máquina ou à mão-de-obra. É preciso levar em consideração a fisiologia da cultura e os aspectos sociais, econômicos e tecnológicos. Do ponto de vista fisiológico da cultura, a colheita representa o final do ciclo de crescimento e maturação, atingindo o máximo de produtividade agrícola permitida pelas condições de clima e solo da região, pela tecnologia agronômica e variedades utilizadas (EMBRAPA, 2015). Alguns fatores relacionados à colheita, carregamento e transporte comprometem a qualidade do produto final, como:
    - Queima antecipada da cana-de-açúcar (no caso de queima pré-colheita);
    - Corte tardio após a queimada;
    - Cana cortada aguardando carregamento, por mais de 24 horas;
    - Excesso de matéria estranha no carregamento;
    - Pisoteio ou destruição das soqueiras pelos empregados ou máquinas de corte, carregamento e transporte.

  Em relação às opções de sistemas de colheita, as operações de corte, carregamento, transporte e recepção da matéria-prima podem ser resumidas em:
    - Sistema manual: o corte e o carregamento são feitos manualmente, podendo haver transporte intermediário;
    - Sistema semi-mecanizado: envolve o corte manual e o carregamento nas unidades de transporte, por carregadoras mecânicas;
    - Sistema mecanizado: utiliza cortadoras de cana e carretas de transbordo empregando somente mão-de-obra especializada como operadores de máquinas e tratoristas, sem a necessidade do emprego de trabalhadores braçais. A colheita mecanizada tem como principal vantagem a rapidez

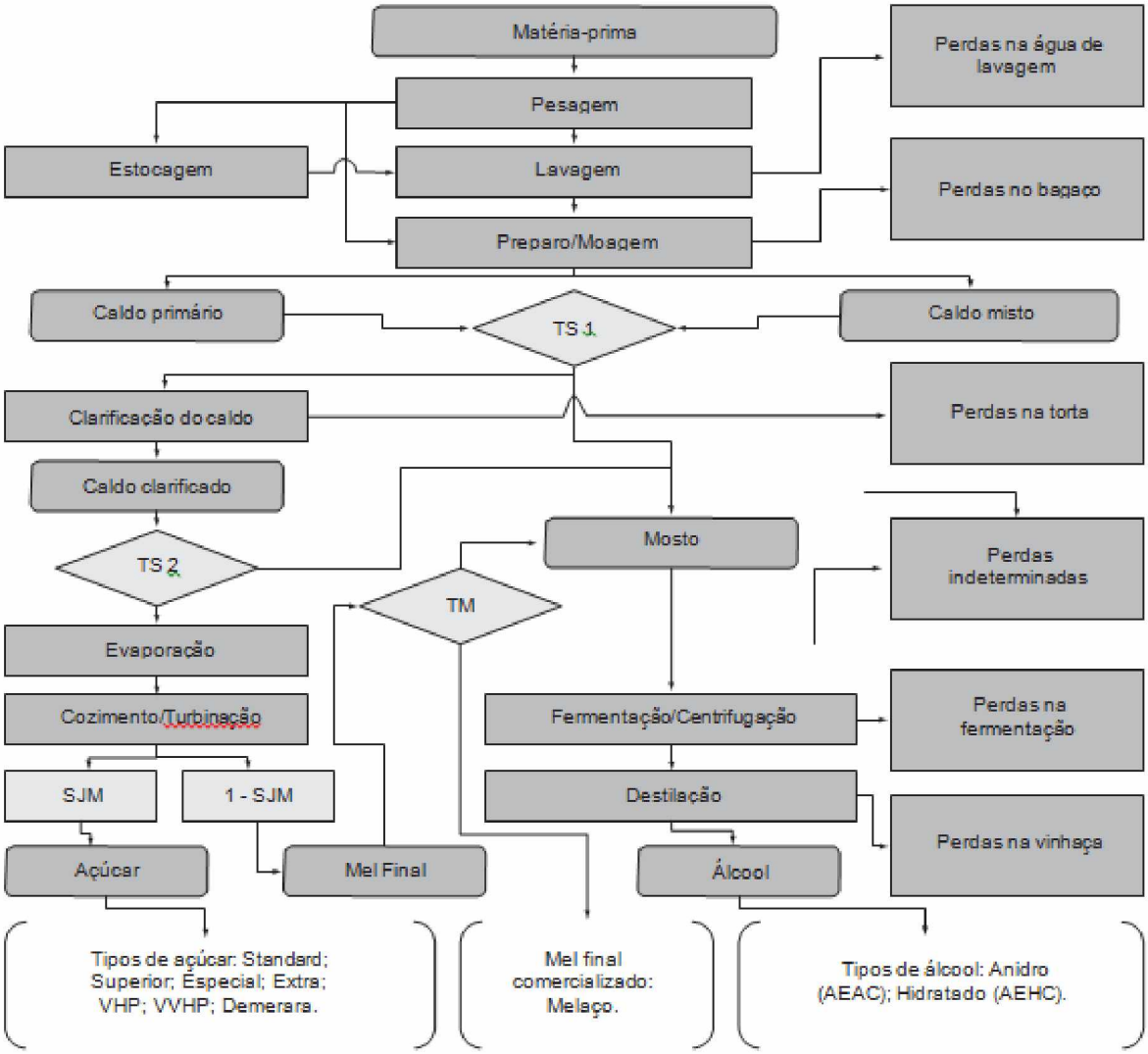
na execução do trabalho, porém, se esse trabalho não for bem executado as perdas em eficiência serão maiores.

Quadro 1: Espécies de cana-de-açúcar

Espécie	Características
Saccharumofficinarum	Canas nobres ou tropicais, apresentam elevado teor de açúcar, porte elevado, colmos grossos e baixos teores de fibras. Algumas variedades desta espécie são: cana preta, rosa, riscada, roxa, manteiga, caiana, entre outras. São variedades muito exigentes por boas condições de clima e de solo, além de serem mais sensíveis a algumas doenças.
Saccharumspontaneum	As variedades desta espécie apresentam colmos curtos, finos e fibrosos, e, por isso, o teor de açúcar é consideravelmente baixo. Por outro lado, apresentam como vantagens, um perfilhamento vigoroso e abundante, além de suportarem bem condições adversas de clima e solo e de serem resistentes a doenças.
Saccharumsinensis	As variedades da China e do Japão pertencem a esta espécie e apresentam como características o porte elevado, os colmos finos e fibrosos, teor médio de açúcar e raízes abundantes e fortes. Apresentam resistência mediana a algumas deficiências nutricionais do solo, bem como a algumas adversidades climáticas.
Saccharumbarberi	Esta espécie apresenta porte baixo a médio, colmos finos, fibrosos e pobres em açúcar. É uma espécie bastante rústica.
Saccharumrobustum	As variedades desta espécie apresentam colmos muito altos, chegando a atingir até dez metros de altura. Além disso são colmos grossos, muito fibrosos (cana dura) e apresentam baixos teores de açúcar.
Fonte: EMBRAPA 2015.	

A Figura 4 mostra o fluxograma básico do processamento da cana-de-açúcar para obtenção de açúcar, álcool hidratado, álcool anidro, desde a recepção da matéria-prima do produtor rural, passando por todas etapas do processo, como Receção, Pesagem, Lavagem, Moagem, Fermentação e Destilação.

Figura 4: Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço.

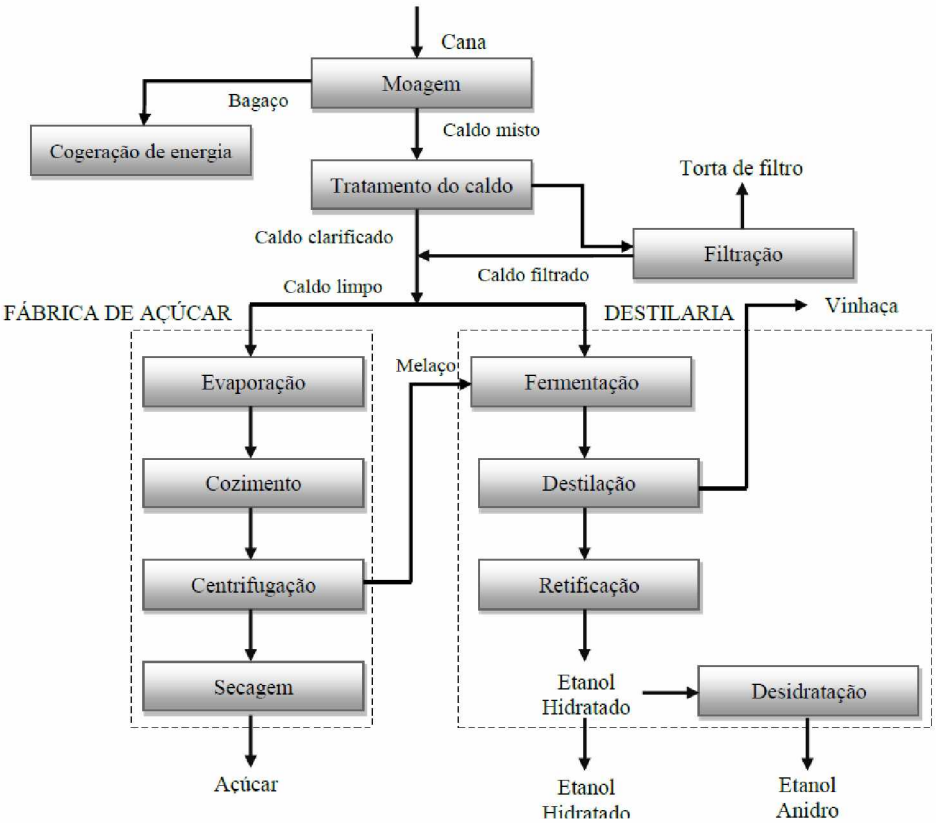


Fonte: IBGE/Unica (2008)

2.2 SISTEMA SUCROALCOOLEIRO BRASILEIRO

A configuração industrial mais adotada no Brasil (Figura5) é a destilaria de etanol anexa à usina de açúcar devido às grandes vantagens decorrentes da produção simultânea desses dois produtos. Frequentemente, a alta volatilidade de mercado no setor sucroalcooleiro exige que os investidores estejam preparados à necessidade de adequação às variações de demanda (MACEDO, SEABRA, & SILVA, 2008).

Figura 5: Esquema do processo na usina de cana-de-açúcar



Fonte: Embrapa (2015)

No presente estudo, considerou-se trêsusinas localizadas no Triângulo Mineiro / MG, e Noroeste de São Paulo, próximas a um raio de 300 km, a um passo que as avaliações dos fluxos de energia e massa puderam ser analisadas a partir de um modelo global ou fragmentado, ou seja, caracterizou-se os processos que envolvem a produção de etanol e açúcar de forma acopladaou desconectada entre si. A qualidade de análise se deu a partir da definição clara dos sistemas de controle analisados e considerando as questões de alocações de cargas ambientais nas etapas industriais que envolvem consumo de energia e de massa, preço de mercado, equipamentos e insumos. A seguir será relacionada uma descrição detalhada de cada etapa envolvida no processo industrial de obtenção do etanol e açúcar da cana.

2.2.1 RECEPÇÃO, PREPARO E EXTRAÇÃO DO CALDO

A unidade industrial de recepção, preparo e extração do caldo é responsável pelo condicionamento da cana por meio da limpeza e abertura das células para que a extração do caldo seja eficiente, visando a mínima perda de açúcares, além da

redução da umidade final do bagaço. Nesta unidade, análises de qualidade, tais como: propriedades da fibra, pureza do caldo e teor de sacarose (UNICAMP & CGEE, 2009) são imprescindíveis para avaliação da qualidade do caldo e potencial para a obtenção de etanol e açúcar. Essa seção é composta por uma infinidade de equipamentos pesados e transportadores de bagaço e cana, por isso, é essencial que haja otimização da sequência de operações de forma que os equipamentos possuam alto desempenho e atuem harmonicamente.

A gestão eficaz desse setor é um fator altamente relevante para uma usina devido à elevada influência na eficiência de obtenção dos produtos finais, consumo de água e energia, além dos altos custos de implantação, operação e manutenção (LEAL, 2010).

Após a colheita da cana, esta chega à usina com certa quantidade de terra e impurezas. Geralmente, quando a cana é colhida manualmente e queimada, a lavagem é feita a fim de retirar as impurezas. Tais impurezas, se não são removidas, exercem papel negativo em todo o processo industrial, principalmente provocando desgaste das tubulações, bombas, aquecedores, registros, moendas, etc. Além disso, prejudicam a decantação do caldo e a filtração do lodo (RODRÍGUEZ, 2010).

A cana é colhida inteira a partir do corte manual e então é lavada para diminuição das impurezas na própria mesa de recepção, embora a lavagem afete seu processamento nas etapas posteriores (LEAL, 2010). A cana que é colhida mecanicamente é recebida na usina na forma de talos picados. Neste caso o procedimento de lavagem não é realizado devido às elevadas perdas de sacarose. Por esse motivo, algumas usinas utilizam o sistema de limpeza a seco, onde a cana é limpa a partir de ventiladores ou exaustores (UNICAMP & CGEE, 2009).

A cana resultante do corte e limpeza mecanizada é descarregada diretamente em mesas alimentadoras de 45° ou 30° (LEAL, 2010) e transferidas para as esteiras de transporte que conduzem a cana para o setor de preparo, onde é submetida ao procedimento de nivelamento em picadores e desfibramento e abertura de células em desfibradores de martelos oscilantes (CGEE & BNDES, 2008). Esta etapa é essencial para o fornecimento de um colchão de cana contínuo e uniforme de forma a facilitar as operações de preparo e moagem (LEAL, 2010).

Após passar pela mesa de alimentação, a cana é transportada para os equipamentos de preparo, conduzidas por esteiras metálicas onde a camada de cana

é nivelada e picada por dois conjuntos de facas rotativas que funcionam no sentido de rotação das esteiras (UNICAMP & CGEE, 2009).

O acionamento dos sistemas de facas rotativas e desfibradores que compõem a operação de preparo da cana é feita por turbinas à vapor ou motores elétricos (PELLEGRINI, 2009). Geralmente, as turbinas à vapor são de simples ou três estágios, cujos consumos específicos são da ordem de 13 a 16 kg/kWh, e atingem o máximo de 60 % de rendimento isoentrópico (PAYNE, 1989). Os motores elétricos utilizados são utilizados de acordo com as especificações mecânicas do sistema de preparo.

O desfibrador tem a função de completar o preparo da cana a partir do rompimento da maior quantidade possível de células. É composto de um rotor com martelos oscilantes que realiza o desfibramento da cana ao esfregá-la contra uma placa desfibradora que tem o formato curvo e acompanha o diâmetro do giro dos martelos. Assim, a cana é pulverizada e as células contendo açúcares são abertas, e o açúcar é extraído mais facilmente pelas moendas. Para obtenção de elevada eficiência de extração é necessário que pelo menos 82% das células estejam abertas (RAMOS, 2010). O tambor alimentador é responsável por forçar a passagem da cana entre os martelos e a placa desfibradora (LEAL, 2010).

Na saída do desfibrador, a altura do colchão de cana é uniformizada pelo espalhador. Este equipamento tem a função de descompactar a cana desfibrada para obtenção de uma camada fina e uniforme. A partir daí a cana desfibrada é transportada por uma esteira deborracha que passa por um eletroímã que retira qualquer material ferroso ou magnético que tenha vindo com a cana e que possa causar algum dano às estruturas de extração (MARQUES 2009). Para aumentar a capacidade de alimentação da moenda, a cana desfibrada passa por uma calha que forma uma coluna com maior densidade e adentra a primeira etapa de moagem pressionada por gravidade. O nível da cana dentro da calha é utilizado para controlar o fluxo de cana para a moenda (UNICAMP & CGEE, 2009).

De acordo com Payne (1989), para se obter um bom preparo é necessário liberar a máxima quantidade possível do caldo proveniente da estrutura celular da cana de forma que não haja redução do tamanho da fibra, tal que a alimentação dos ternos da moenda seja comprometida. O indicador nomeado “índice de preparação” quantifica o grau de preparação da cana. Este é obtido a partir de ensaios que determinam o número de células abertas (PELLEGRINI, 2009), sendo cerca de 90%

para a extração por moendas e 94 % por difusão (PAYNE, 1989). As peculiaridades desses sistemas serão descritas na sequência do trabalho.

A extração do caldo consiste na separação física da fração líquida do colmo, contendo açúcares (caldo), da fração de fibra de cana (bagaço), com o máximo de eficiência possível (MARQUES, 2009). O processo de extração do caldo inicia-se logo após o preparo da cana. Este é então tratado e concentrado para ser destinado à produção de etanol e/ ou açúcar e tem como objetivo separar os materiais (PAYNE, 1989) de forma que recupere a máxima quantidade possível de caldo e produza o bagaço com a umidade adequada para uma queima satisfatória na caldeira (PELLEGRINI, 2009).

A obtenção de uma elevada capacidade de moagem e eficiência de extração são parâmetros primordiais no intuito de atingir alta produtividade nas usinas (LEAL, 2010), por isso, nos últimos anos, os seguintes componentes de projeto foram otimizados: calha *Donnely* (alimentação por gravidade), embebeçam, rolos de pressão, eixos e castelos de moendas, esteiras e moendas e aplicação da automação (CTC, 1990).

A tecnologia padrão de extração, típica nos processos da indústria brasileira, é a moagem, que consiste em extrair o caldo por meio de fricção mecânica a partir de rolos de pressão e alimentação que submetem uma pressão mecânica à cana desfibrada (MARQUES, 2009). A extração do caldo também pode ser feita via difusores ou em sistema de extração hidrodinâmica, entretanto esta tecnologia ainda não se consolidou no mercado.

2.2.2 SISTEMA DE MOENDAS

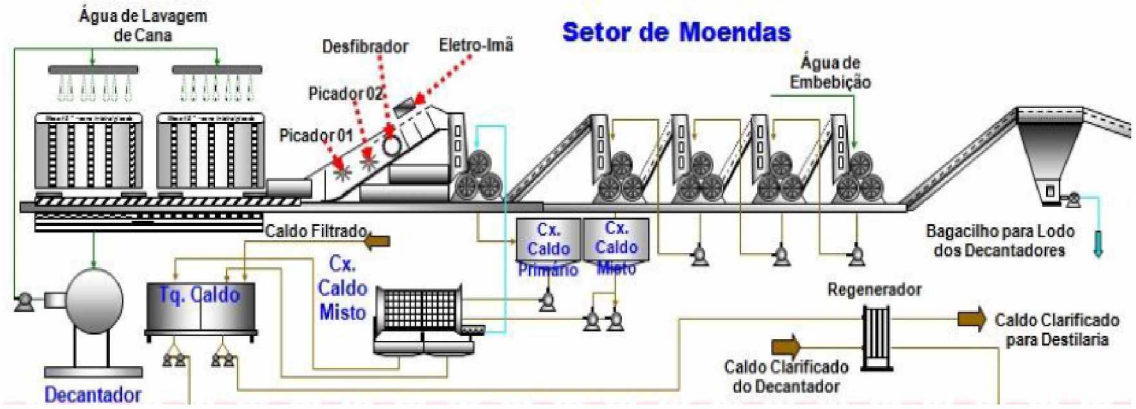
A moagem é um processo de extração do caldo que consiste em passar a cana entre dois rolos, com uma pressão pré-estabelecida (MARQUES, 2009). Trata-se de um processo de separação física em que a sacarose é separada das fibras vegetais por meio do esmagamento mecânico das células da cana, o que ocorre quando a cana desfibrada passa por conjunto de moendas denominadas ternos (PIACENTE, 2010).

O sistema de moendas pode ser composto por 4 a 7 ternos em série, sendo um terno constituído de rolos de esmagamento. Esses são dispostos em triângulos de maneira que a fibra seja empurrada duas vezes na entrada e na saída do terno. O

controle da capacidade de moagem é feito em função da abertura entre o rolo de entrada (fixo) e o rolo superior, cuja posição é estabelecida por um regulador de pressão hidráulica entre o rolo superior e o rolo de saída. A quantidade de fibra que passa pela moenda na unidade de tempo é o parâmetro utilizado para a regulagem da abertura (PELLEGRINI, 2009).

Normalmente, o caldo extraído (Figura6) no primeiro terno é enviado para a fábrica de açúcar (por ser de melhor qualidade) e o restante do caldo vai para a destilaria. A eficiência de extração de açúcares varia entre 94,0 a 97,5% e a umidade final do bagaço fica em torno de 50% (UNICAMP & CGEE, 2009).

Figura6: Processo de extração do caldo



Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

Com o objetivo de aumentar a diluição do caldo e aumentar a extração do caldo no terno seguinte utiliza-se a embebeçam. Trata-se de um processo no qual a água ou caldo é aplicado sob a forma de aspersão, jatos pressurizados ou bicas de embebeçam (CAMARGO & USHIMA, 1990). De acordo com Hugot (1986), o valor ótimo de embebeçam está na faixa de 2 kg de água por kg de fibra na cana. A embebeçam é tradicionalmente realizada à temperatura ambiente, porém há autores que sugerem a utilização de água quente (cerca de 80ºC) (PAYNE, 1989).

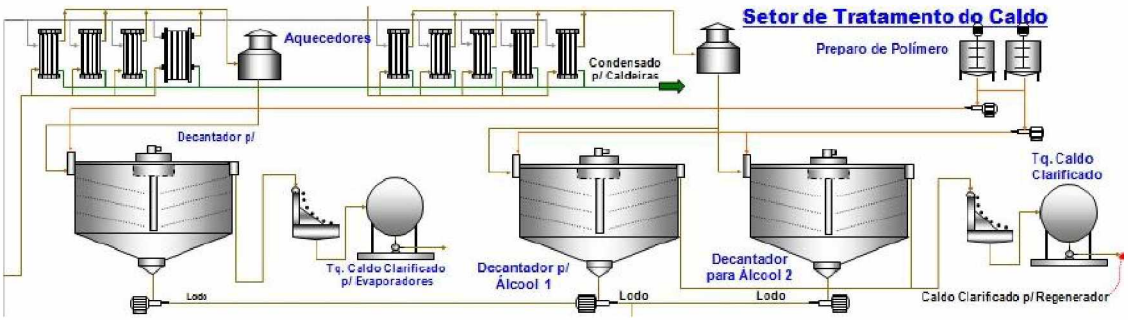
O caldo é então no processo de difusão extraído da cana desintegrada por um fluxo contracorrente de água. Esse processo ocorre de duas maneiras distintas. Parte do caldo é extraída por meio de um processo de lavagem (lixiviação) (PIACENTE, 2010) e outra parte do caldo é extraída por meio de um processo de troca físico-química causado por pressão osmótica e difusão celular (PELLEGRINI, 2009).

Após o difusor, o bagaço é enviado para uma prensa para o deságue, originando o caldo de retorno. Para difusão, a água de embebição e do caldo de retorno da prensa devem ser mantidos a 80ºC a fim de evitar o desenvolvimento de micro-organismos (PROCKNOR, 2001). É possível atingir valores maiores de eficiência de recuperação (9% no máximo) na difusão para quantidades de água acima de 300 kg/t cana (PELLEGRINI, 2009).

Após sair da fase de extração, o caldo de cana deve ser tratado para remoção das impurezas existentes em sua composição para que possua qualidade adequada para seu processamento subsequente. Para isso, o tratamento do caldo deve ser realizado de forma que sejam removidas substâncias dissolvidas e materiais insolúveis (PELLEGRINI, 2009). Desta forma se faz necessária a correção do pH, a fim de evitar a inversão e decomposição da sacarose (UNICAMP & CGEE, 2009), resultando em perdas mínimas durante os processos subsequentes (PELLEGRINI, 2009).

De acordo com Cortez *et al.* (2008), o tratamento do caldo baseia-se na eliminação de impurezas grosseiras, tais como bagacilho e areia, eliminação de partículas coloidais, preservação de vitaminas, açúcares e aminoácidos e eliminação de contaminantes microbianos. A Figura7 mostra o funcionamento dessa etapa.

Figura7: Descrição básica do processo de tratamento do caldo



Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

Embora os tratamentos para etanol e açúcar sejam semelhantes, existem algumas diferenças nos procedimentos de obtenção de caldo para produção de açúcar e etanol. O caldo para açúcar, sofre um procedimento mais rigoroso com a utilização de mais produtos químicos, visando separar, além de sólidos, corantes ou percursores de cor (CGEE & BNDES, 2008). Primeiramente, o caldo passa por uma etapa de tratamento físico para que seja realizada a remoção dos sólidos insolúveis

(basicamente areia, argila e bagacilho), cerca de 0,1% e 1,0%, por meio de peneiras. Posteriormente, o caldo é submetido a tratamento químico, removendo as impurezas coloidais e solúveis, além de impurezas insolúveis que não foram eliminadas no peneiramento. Esta segunda etapa é composta pelos processos subsequentes de coagulação, floculação e precipitação, sendo as impurezas precipitadas eliminadas por sedimentação (CORTEZ *et al*, 2008).

O caldo proveniente da extração na moenda, contendo 10 a 19% de açúcares (CORTEZ *et al*, 2008), é peneirado e separado do bagacilho. Este então retorna à moenda ou é filtrado para a separação do lodo. O caldo peneirado é pré-aquecido e seu pH é elevado com hidróxido de sódio (leite de cal) (para 6,0 ou mais), levando a formação de flocos. Posteriormente, o caldo é aquecido até a temperatura de ebulição para que os gases sejam separados ao passar por balões.

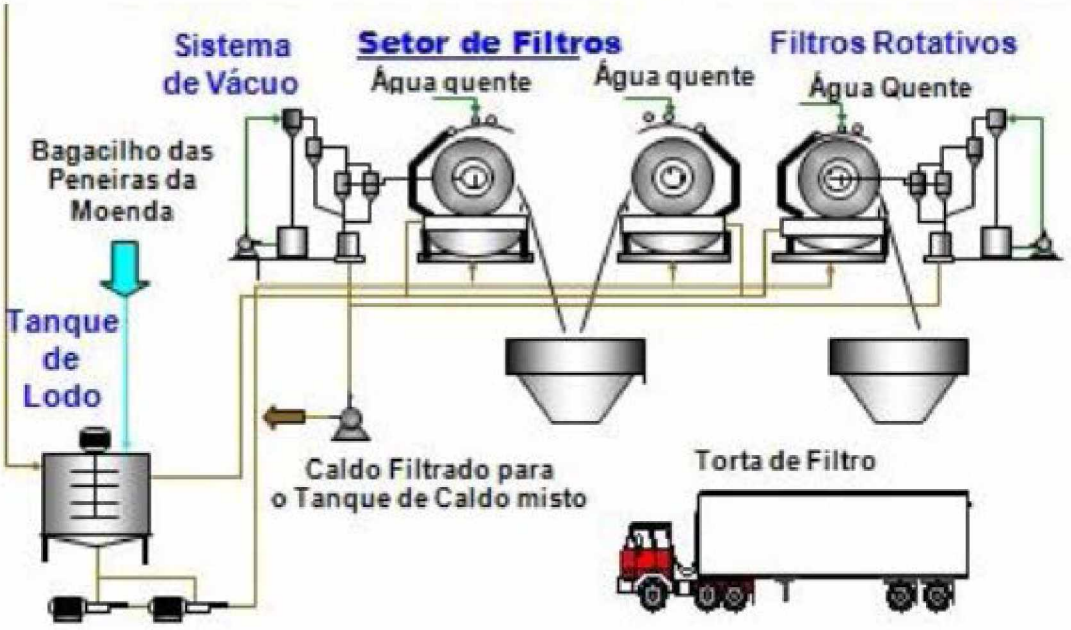
Para auxiliar na decantação e clarificação, são adicionados ácido fosfórico e polímeros, onde o caldo permanece em repouso de 40 minutos a 2 horas (CORTEZ *et al*., 2008). O caldo clarificado é retirado como sobrenadante livre de microrganismos e o precipitado, o lodo contendo uma grande quantidade de impurezas compostas por os sais de cálcio (magnésio e fosfato), matéria orgânica coagulada (proteínas e polissacarídeos) e fibras arrastadas pelos flocos é removido também do processo (CORTEZ *et al*., 2008).

2.2.3 TORTA DE FILTRO

O lodo decantado é submetido à filtração para a recuperação do caldo a partir da utilização de filtros rotativos à vácuo (PELLEGRINI, 2009). Neste processo, os sólidos são concentrados e lavados com água condensada. O caldo proveniente dessa lavagem é então reciclado ou enviado para nova decantação (CORTEZ *et al*, 2008).

O líquido resultante da filtração retorna ao processo e o resíduo sólido, a torta de filtro, é misturada com outros resíduos e compostada (CORTEZ *et al*, 2008) para ser destinada à fertilização nos campos de cultivo da cana-de-açúcar (OMETTO, 2005). O funcionamento detalhado do processo de obtenção da torta de filtro é mostrado na Figura8.

FIGURA8: PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TORTA DE FILTRO



Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

2.2.4 PROCESSO DE FERMENTAÇÃO

O processo de fermentação mais comumente utilizado em usinas brasileiras é o *Melle-Boinot*. Parte do caldo clarificado é misturado com o mel final proveniente da fabricação de açúcar, formando o mosto, o qual é enviado para as dornas de fermentação. O Brix do caldo enviado às dornas varia entre 16 a 20°Brix e dependem da origem do mosto (PELLEGRINI, 2009).

O mosto é então misturado a leveduras (fungos unicelulares da espécie *Saccharomycescerevisae*) e fermentado por um período de 8 a 12 horas, originando o vinho (mosto fermentado, com uma concentração de 7 a 10% de etanol) (CGEE & BNDES, 2008). Tais micro-organismos convertem a sacarose em etanol e dióxido de carbono (CORTEZ, LORA, & GÓMEZ, 2008), de acordo com a Equação1.

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$ EQUAÇÃO1

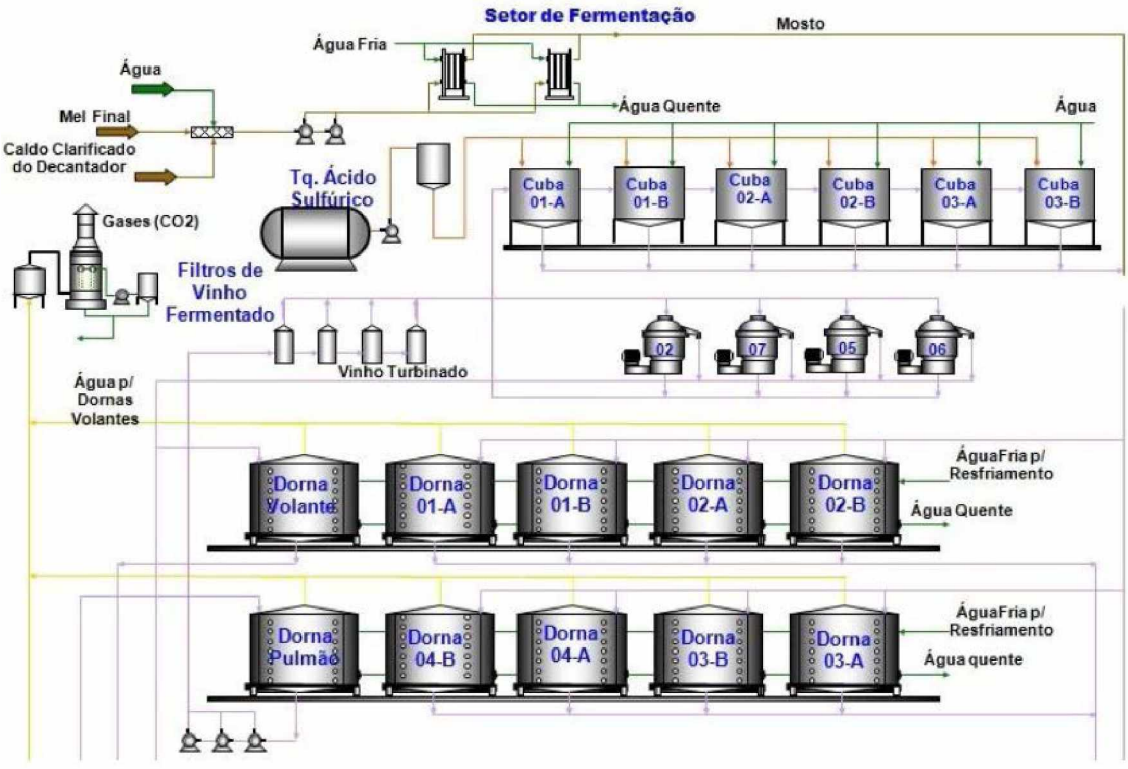
De acordo com Cortez *et al*. (2008), os principais equipamentos utilizados na fermentação são dornas de fermentação (são necessárias 7 a 10 m^3 de dornas por m^3 de álcool produzido por dia), trocadores de calor para resfriamento, tanques de

tratamento de ácido, centrífugas (capacidade volumétrica correspondente à vazão média de vinho) e dorna volante (com volume igual ao da dorna de fermentação).

Durante a reação no interior das dornas, ocorre uma intensa liberação de dióxido de carbono e calor, dando origem a formação de produtos secundários como álcoois superiores, glicerol, aldeídos, etc. Para manter a temperatura da dorna entre 32 e 35°C. são instaladas serpentinas com circulação de água em seu interior (PELLEGRINI, 2009).

O vinho é enviado às centrífugas para a recuperação da levedura, que depois retorna às cubas para tratamento. A recuperação das leveduras se faz com centrífugas de alta eficiência capazes de concentrar 65% em volume, estando prevista a centrifugação sequencial em duas etapas com diluição intermediária da levedura com água (UNICAMP & CGEE, 2009). A fase menos densa da centrifugação (vinho delevedurado) é envidada para as colunas de destilação. O teor alcoólico do vinho produzido é de 9°GL e o rendimento estequiométrico da fermentação é de aproximadamente 91% (PELLEGRINI, 2009). A Figura9 mostra as etapas do processo fermentativo.

Figura9: Processo de fermentação



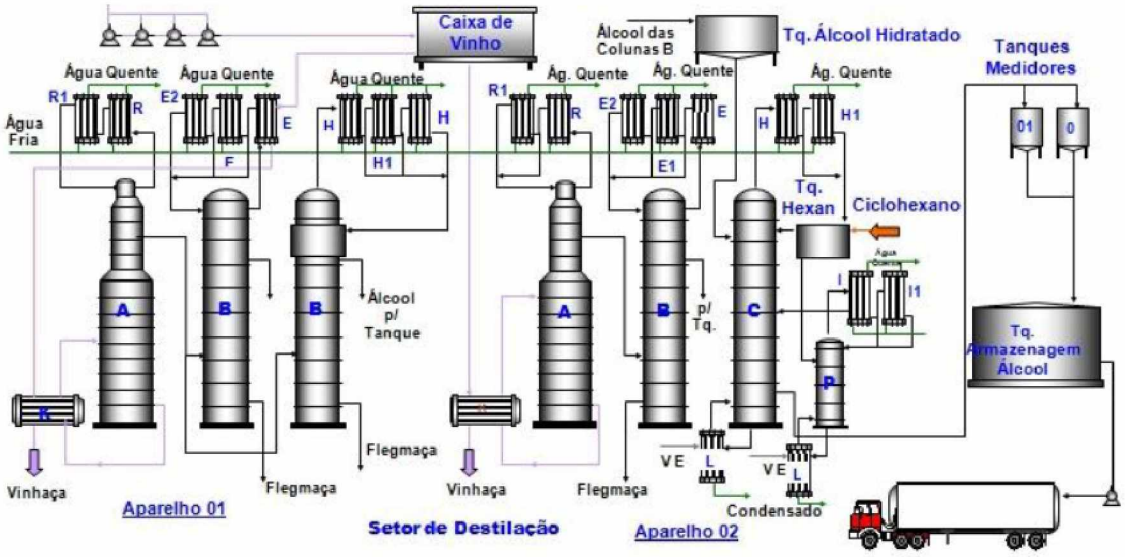
Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

2.2.5 PROCESSO DE DESTILAÇÃO E DESIDRATAÇÃO

O princípio da destilação se baseia na diferença entre o ponto de ebulição da água (100°C) e do etanol (78,4°C). A mistura água e etanol apresenta ponto de ebulição variável em função do grau alcoólico. Assim, o ponto de ebulição de uma solução hidro alcoólica é intermediário entre aquele da água e do álcool e será tanto mais próximo deste último quanto maior for o grau alcoólico da solução (EMBRAPA, 2015).

Uma mistura hidro alcoólica (álcool e água) com teor alcoólico mínimo de 92,6°GL, o etanol hidratado, pode ser estocado como produto final ou pode ser enviado para a coluna de desidratação para obtenção de etanol anidro. Mas, como se trata de uma mistura azeotrópica, seus componentes não podem ser separados por uma simples destilação. A Figura10 mostra o padrão de destilaria utilizada no Brasil.

Figura10: Processo de destilação de desidratação com ciclohexano



Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

A fim de se obter etanol anidro, é ainda necessário desidratar o etanol hidratado, seja por meio de uma coluna operando com ciclohexano (destilação extrativa) ou em peneiras moleculares. A concentração final do etanol anidro atinge 99,7°GL. Esses sistemas necessitam de vapor de baixa pressão(para o agente desidratante ciclohexano) ou vapor de média pressão(peneira molecular) (PELLEGRINI, 2009).

2.2.6 PROCESSO DE OBTENÇÃO DE ETANOL HIDRATADO

Conforme mostrado na Figura11, o etanol no vinho é recuperado pelo processo de destilação, o qual utiliza os diferentes pontos de ebulição das diferentes substâncias voláteis para promover a separação. O vinho é enviado para a Coluna A, na qual a chamada flegma (50°GL) é obtida, e separada em três partes: a coluna de epuração (onde o vinho é alimentado), responsável pela eliminação das impurezas; a coluna de concentração do álcool de segunda (produto de topo); e a coluna de esgotamento do vinho (parte inferior). A flegma, produto com impureza, segue para a Coluna B, chamada de coluna de retificação, onde a concentração da mistura atinge 96°GL. Essa coluna ainda produz o óleo fúsel, composto de produtos secundários da fermentação (PELLEGRINI, 2009).

A energia necessária para a operação dessas colunas é fornecida por vapor de baixa pressão por meio da troca direta (barbotagem) ou indireta (uso do refervedor). Além da flegma, a destilação do vinho também gera a vinhaça. A flegma é destilada novamente resultando na flegmaça, que é utilizada para assepsia dos equipamentos. As quantidades de vinhaça e flegmaça formadas variam entre 9 a 15 L/L de etanol (flegmaça mais vinhaça) dependendo do tipo de troca com vapor (PELLEGRINI, 2009).

De acordo com Oliveira (2010), a maioria dos equipamentos no Brasil utilizam a barbotagem (uso direto) do vapor vegetal (vapor de água obtido por evaporação da água do caldo de cana) na destilação, cujo vapor vegetal se condensa em contato com o vinho dentro do aparelho de destilação resultando em um aumento da vinhaça gerada. A riqueza alcoólica da vinhaça deve ser nula, porém nela se acumulam todas as substâncias fixas do vinho, bem como substâncias voláteis. A vinhaça é direcionada à uma lagoa para armazenamento e distribuída por tubulação para ser utilizada na fertirrigação da cana-de-açúcar.

Nas destilarias brasileiras, existem em operação unidades pequenas, com capacidade na faixa de 50.000 a 150.000 L/dia, até unidades grande capacidade, próximas a 800.000 L/dia, mas grande parte têm capacidade em torno de 300.000 litros/dia. O consumo de vapor nas unidades de etanol hidratado oscila na faixa de 1,8 a 2,6 kg vapor/litro de etanol produzido, variando com o teor alcoólico do vinho alimentado ao processo e com o número de bandejas das colunas de destilação empregadas (CORTEZ *et al*, 2008).

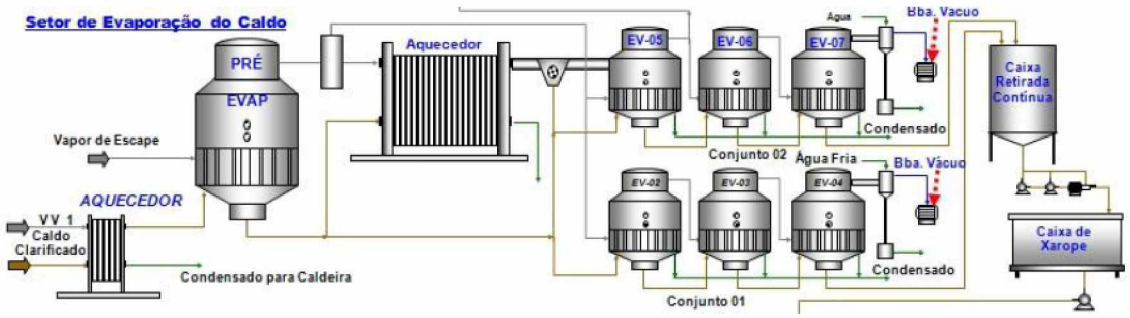
2.2.7 PROCESSO DE EVAPORAÇÃO

O processo de evaporação é o primeiro estágio de concentração de caldo clarificado proveniente da planta de tratamento que passa por um processo de concentração para eliminação da água e produção dos cristais de açúcar (PELLEGRINI, 2009). Sua principal função é a concentração de caldo com 14 a 17°Bx até uma concentração de 60 a 70 °Bx, conhecida como xarope (CAMARGO & USHIMA, 1990).

Após a decantação, o caldo para açúcar passa por uma série de evaporadores (Figura11). O primeiro pressurizado e os restantes a vácuo crescente, retirando a água do caldo e aumentando a concentração de sacarose (CORTEZ *et al*, 2008).

Nas usinas brasileiras, o sistema de evaporação de múltiplos-efeitos (múltiplas evaporações) correntes paralelas, ou seja, tanto caldo como vapor são alimentados no 1° efeito seguindo paralelos até o último efeito. O tipo de evaporador mais comum na indústria brasileira de açúcar e etanol é o de tubo vertical com fluxo ascendente, construído em aço carbono. O corpo é formado por um cilindro vertical que se eleva sobre a calandra circular, efetuando a troca de calor (HUGOT, 1986; CAMARGO & USHIMA, 1990).

Figura11: Processo de evaporação do caldo



Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

O processo de evaporação do caldo de cana é o principal consumidor de vapor de escape das turbinas de uma usina sucroalcooeira. Este processo é responsável pela "produção" do vapor vegetal utilizado nos mais diversos processos de aquecimento do processo produtivo (tratamento do caldo, cozimento, destilação, dentre outros.

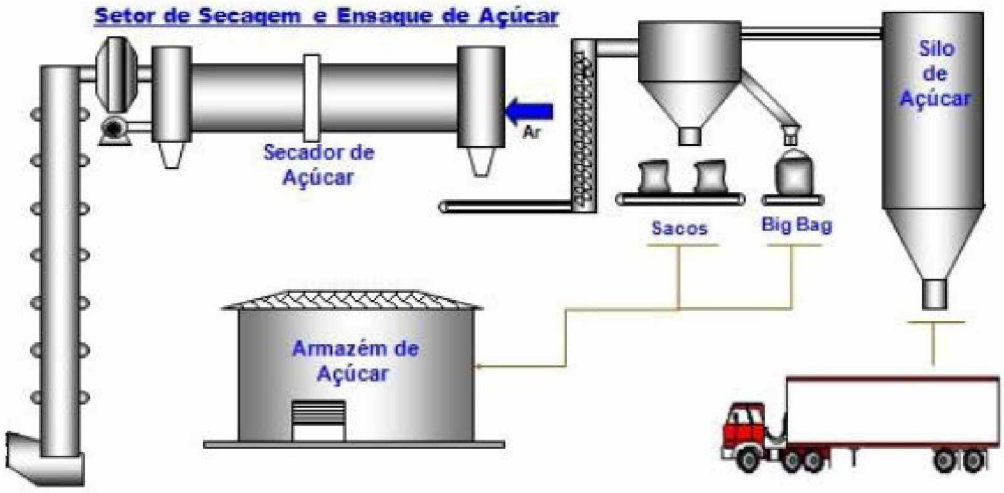
Assim, pode-se dizer que este processo é o responsável pela integração entre a planta de utilidades (processos auxiliares à usina) e o processo em uma usina (PELLEGRINI, 2009). Logo, a maximização do desempenho da planta de utilidades deve levar em consideração modificações que reduzam o consumo de vapor de escape.

2.2.8 PROCESSO DE CENTRIFUGAÇÃO

A massa cozida com cristais e mel é submetida a uma centrifugação e os cristais de açúcar separados, secados e armazenados. O mel proveniente da massa de menor pureza denominado de melaço ou mel final é enviado para a destilaria para a produção de etanol, ou comercializado como subproduto in natura (PIACENTE, 2010). O mel removido é coletado em um tanque e retorna aos cozedores para recuperação do açúcar dissolvido ainda presente, até que se atinja um maior esgotamento do mesmo (PELLEGRINI, 2009).

Os produtos finais desse processo são os cristais de açúcar e o mel residual (PELLEGRINI, 2009). Pode-se misturar o mel com o xarope e encaminhá-los novamente para a cristalização e centrifugação. Como última etapa do processo de fabricação de açúcar, os cristais são levados por esteiras transportadoras ao secador onde recebem ar quente. O produto desta etapa pode ser comercializado desta forma ou seguir para a fabricação de outros produtos, como o açúcar invertido, o açúcar refinado ou o açúcar líquido. Como o açúcar extraído nas centrífugas tem um elevado grau de umidade, ele é enviado para os secadores antes de ser ensacado (PELLEGRINI, 2009). Após a secagem (Figura12), o açúcar é armazenado (MARQUES, 2009).

Figura12: Processo de evaporação do caldo



Fonte: Usina Santa Elisa (2015)

2.3 UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS QUANTITATIVOS NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

No Brasil, em meados de 1990, há o surgimento de algumas contribuições sobre a utilização de métodos quantitativos empregados em diversos setores da indústria sucroalcooleira.

Podem ser exemplificadas por Barata (1992) que utilizou a programação linear para desenvolver um modelo avaliativo técnico-econômica aplicado ao corte e a reforma de canaviais. Outro exemplo é Lopes (1995) que modelou um sistema de transporte, carregamento e reboque a fim de identificar e analisar as variáveis que influenciam o custo de cada uma das operações envolvidas. Grisotto (1995) que também apresentou um modelo de otimização do tempo de viagem de caminhões utilizados no transporte de cana-de-açúcar. Yoshizaki *et al.* (1996) aplicaram programação linear para modelar o problema da distribuição centralizada de álcool no sudeste do Brasil. Yamada (1999) utilizou redes Petri atemporizadas para modelar todas as etapas de produção de açúcar e álcool, procurando validar a utilização desta técnica tanto para as etapas discretas quanto para as etapas contínuas desse processo produtivo. Colin *et al.* (1999) apresentaram um modelo de programação linear para otimização do sistema logístico de distribuição e armazenamento de açúcar, considerando um depósito central e diversos depósitos secundários. Iannoni e Morabito (2006) estudaram o sistema de recepção de cana de uma usina, utilizando simulação discreta para analisar a logística de transporte de cana. Kawamura *et al.*

(2005) apresentaram um modelo de programação linear, multiperíodo, para tratar decisões de transporte e estocagem dos produtos de uma cooperativa de comercialização de açúcar e álcool.

Em outros países produtores de cana-de-açúcar (Austrália, Cuba, Colômbia), a utilização menos recente de trabalhos com modelos e métodos quantitativos aplicados aos problemas da indústria sucroalcooleira. Por exemplo, Whan *et al.* (1976) desenvolveram um modelo de composição de variedades de cana-de-açúcar, objetivando otimizar o retorno financeiro de uma fazenda e tendo em conta a programação da colheita que seria adotada na safra (curva de sacarose).

Abel *et al.* (1981) desenvolveram um modelo de programação da colheita de cana-de-açúcar, utilizando transporte ferroviário. Mathew e Rajendran (1993) utilizaram simulação para analisar a programação das atividades de manutenção de uma usina açucareira, onde se pretendeu determinar um bom intervalo entre as paradas para manutenção da usina. Higgins *et al.* (1998) aplicaram um modelo de programação matemática para a determinação da programação da colheita de cana-de-açúcar ao longo de uma safra. Cock *et al.* (2000) apresentaram uma metodologia para escolha de variedades de cana por meio da análise do custo total de processamento das variedades. Higgins e Davies (2005) aplicaram simulação computacional para planejar a capacidade do sistema de transporte de cana-de-açúcar. Além destes trabalhos, outros mais recentes apresentam modelos e métodos de otimização matemáticos aplicados à programação e integração do corte de cana com o transporte desta matéria-prima até a usina (HIGGINS *et al.*, 2004; MILAN *et al.*, 2005; HIGGINS, 2006).

Percebe-se então que a medida que o mercado sucroalcooleiro cresce, há um aumento no desenvolvimento e aplicação de modelos e métodos quantitativos para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro. O destaque ainda é para os modelos de planejamento da colheita, modelos de programação do transporte de cana, de distribuição e armazenagem de açúcar e álcool, de seleção de variedades e de programação da reforma do canavial. Todos estes trabalhos estão voltados para a etapa agrícola, etapa de Corte Carregamento e Transporte (CCT) e estoque de produtos finais.

Na etapa industrial, os esforços que vêm sendo empregados para modelar o processo de produção de açúcar, álcool e subprodutos estão mais restritas as áreas da engenharia química, engenharia de alimentos, engenharia elétrica, engenharia de

processo açucareiro e alcooleiro(HIGGINS *et al.*, 2004; MILAN *et al.*, 2005; HIGGINS, 2006).

Estes estudos estão focados na representação das transformações químicas e físicas que acontecem nas diversas operações unitárias de produção de açúcar e álcool, embasando estudos de análise de investimentos e de melhorias de projeto de equipamentos (ALVES, 1994; LEE *et al.*, 1999; ALEGRE *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2005; VAN WISSEN *et al.*, 2005). Por outro lado, modelos e métodos quantitativos, aplicados ao planejamento das atividades da etapa industrial das usinas de açúcar e álcool não estão disponíveis na literatura. Tendo isso em vista e destacando que esta etapa do sistema agroindustrial canavieiro envolve decisões importantes, entendemos que modelos deste tipo também deveriam ser contemplados. Ou seja, ainda existem grandes oportunidades para a modelagem matemática em vários setores desta indústria.

Dentro desta percepção e considerando a crescente tendência de utilização de uma estratégia de diversificação produtiva nas usinas de açúcar e álcool, existe uma importância de se desenvolver e aplicar modelos quantitativos de planejamento da produção de forma que se possa atingir, da melhor forma possível, os objetivos estratégicos e comerciais da empresa.

2.3.1 PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional, ramo da Matemática Aplicada, se apresenta como uma ferramenta importante que tange a facilitar o processo de análise nas tomadas de decisões do sistema industrial. Após simulações no modelo matemático que o representa, com algumas restrições, esse sistema permite que a decisão seja muito bem avaliada antes de ser implementada. A economia obtida e a experiência adquirida pela experimentação justificam a sua utilização (CAIXETA, 2001).

Na Pesquisa Operacional a experimentação tomada no sentido restrito - isto é, a manipulação física das variáveis – é geralmente impossível ou impraticável quando se lida com organizações governamentais, militares ou industriais. Apesar disso, a experimentação as vezes se torna possível, particularmente no caso de subsistemas, e desempenha papel importante na PO. Na maioria das vezes, entretanto, o sistema global em estudo não pode ser submetido a um tratamento desta natureza. Quem trabalha em pesquisa operacional é geralmente obrigado a construir

representações do sistema e do seu comportamento para se orientar durante a pesquisa. Os modelos em PO assumem a forma de uma ou mais equações ou inequações para traduzir a condição de que algumas, ou todas as variações controladas só podem ser manipuladas dentro de limites. O conjunto destas equações constitui, ao mesmo tempo, um modelo de sistema e um modelo de decisão. (TAHA, 2008)

A solução pode ser extraída do modelo mediante experimentação (isto é, por simulação) ou mediante análise matemática. Para alguns tipos de função f (por exemplo, relações algébricas elementares), desde que as restrições não sejam numerosas, a matemática clássica fornece instrumentos perfeitamente adequados para a determinação dos melhores valores das variáveis controladas. Por outro lado, a função f pode consistir em um conjunto de regras de cálculo (um algoritmo) que nos permita medir a utilidade (U) do desempenho para qualquer conjunto de valores das variáveis controladas e não controladas (TAHA, 2008).

Na maioria dos casos, segundo TAHA (2008), o comportamento do elemento humano que tem o poder de decisão não pode ser representado no modelo. Ocorre, então, a necessidade do uso de simulações que envolverão a participação de seres humanos, sendo denominados jogos de operações.

A otimização, portanto, produz a melhor solução para o problema que foi modelado. A correspondência entre modelo e realidade terá de ser aferida (testada) e a solução avaliada, ou seja, comparará o seu desempenho com o da política ou procedimento que ela irá substituir. Os resultados da pesquisa devem ser implantados. É nesta fase que se faz o teste e a avaliação final da pesquisa; proporcionando, pois, ao especialista as maiores e melhores oportunidades de aprender. (ARENALES, 2007)

Cinco fases num projeto de PO:

1. Formulação do problema
2. Construção do modelo
3. Obtenção da solução
4. Teste do modelo e avaliação da solução
5. Implantação e acompanhamento da solução (manutenção)

As vantagens e desvantagens da utilização de modelos foram assim definidas:

- **Vantagens:**

a) Descrita sob a forma gráfica, para representar a realidade aprendida em determinado momento;
b) Simplifica a visualização da amplitude das variáveis sem alterar a essência;
c) Ajuda a identificar várias relações possíveis entre os elementos da realidade;
d) Possibilita compreender relações complexas;
e) Serve como base para estabelecer e aprimorar parâmetros.

- **Desvantagens:**

a) Limitações na identificação de todas as variáveis relevantes que influenciam em determinada situação;
b) Problemas na definição das propriedades a serem mensuradas e na especificação de procedimentos para tal;
c) Dificuldades no entendimento entre os provedores e os usuários da informação.

A representação simplificada de um problema prático por meio de um modelo matemático permite que sobre ele se aplique técnicas e métodos que facilitam a obtenção de uma solução. (ARENALES, 2007)

Tem-se então a seguir alguns dos problemas que têm sido resolvidos por técnicas particulares de pesquisa operacional:

- **Programação Linear:** tem sido usada com sucesso na solução de problemas relativos à alocação de pessoal, mistura de materiais, distribuição, transporte, carteira de investimento, avaliação da eficiência;
- **Programação Dinâmica**: tem sido aplicada também com sucesso a áreas como planejamento de despesas de publicidade, distribuição do esforço de vendas e programação de produção;
- **Teoria das Filas**: tem tido aplicação na solução de problemas relativos a congestionamento de tráfego, máquinas de serviços sujeitas à quebra, determinação do nível de uma força de serviço, programação do tráfego aéreo, projetos de represas, programação de produção e operação de hospitais;
- **Programação Inteira**: que é uma forma de programação linear onde as variáveis podem apenas apresentar números inteiros. Tem sido utilizada na resolução de problemas de investimento dentre outros;

- **Programação Mixta**: que é uma forma de programação linear onde as variáveis podem assumir valores binários, inteiros e contínuos, este modelo também é definido como otimização combinatória, enquadrando-se em problemas de dificuldades não polinomiais NP-HARD;
- **Programação Não-linear**: modelo matemático onde a função objetivo, as restrições ou ambas, apresentam não linearidade em seus coeficientes.
- **Programação Multi-objetivo**: é uma forma de programação linear e não linear onde se analisa múltiplas funções objetivos;
- **Goal Programming**: que é uma extensão dos modelos de programação multiobjetivo, contendo vários modelos específicos para cada problema de decisão;
- Outras técnicas de pesquisa operacional, tais como teoria de estoque, teoria dos jogos, teoria dos grafos e simulação, também tem sido aplicada com sucesso em diversos contextos.

2.3.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A Programação Linear desenvolvida pós segunda guerra mundial, com o objetivo específico de resolver problemas de logística militar foi utilizada pela primeira vez por Stigler, em um problema referente à uma composição de uma mistura (Taha, 2008).

Segundo Caixeta Filho (2001) e Taha (2008) a propagação foi devido ao jovem matemático norte-americano George B. Dantzig e sua equipe, que foram convocados na guerra, no início da década de 40, para oferecer subsídios técnicos para as tomadas de decisão que envolvesse uma distribuição ótima de tropas entre as diferentes frentes de batalhas. Dantzig percebeu que problemas que envolviam limitação de recursos podiam ser resolvidos através de uma sistemática de busca de solução ótima.

O método de programação linear foi popularizado em 1947. A ferramenta mostrou-se tão eficaz que começou a ser utilizada em vários outros segmentos. Hoje existem softwares computacionais que facilitam a determinação da solução de um problema de programação linear. Como um exemplo muito utilizado para solucionar problemas de PL é a ferramenta *Solver* do aplicativo MS Excel. Assim, com isso, a PL

passou a ser utilizada como ferramenta de gestão empresarial e tem sido aplicada para a resolução de vários problemas de produção, de armazenamento de produtos, distribuição dos recursos da indústria, entre outras diversas atividades de produção. A PL pode, ainda, ser aplicada na avaliação de mix e composições de produtos, ligas e produtos químicos, considerando as especificações inerentes, preços e custos, programação de logística, minimização do tempo de setup, distribuição racional dos operários, especificação de dietas, dentre outras vastas aplicações.

De acordo com Corrar e Theófilo (2004, p. 331) "...a Programação Linear é um dos mais importantes instrumentos do campo da Pesquisa Operacional - área do conhecimento que fornece um conjunto de procedimentos voltados para tratar problemas quem envolvem a escassez de recursos".

Para Ehrlich (1985, p. 19), a programação linear é uma ferramenta de planejamento que nos ajuda selecionar que atividades (variáveis de decisão) empreender, dado que essas atividades (diversas alternativas) competem entre si pela utilização de recursos escassos (restrições) ou então precisam satisfazer certos requisitos mínimos. O objetivo será maximizar (minimizar) uma função das atividades, geralmente lucros (perdas).

Segundo as análises de Hiller e Libermann (1988), a PL é um planejamento de atividades para se obter o melhor resultado, onde este alcance a melhor meta especificada, de acordo com o modelo matemático, respeitando todas as variáveis.

A Programação Linear agregada à Teoria das Restrições pode ajudar o administrador nas tomadas de decisão, se utilizada de forma adequada. Com essa combinação de metodologias é possível avaliar o nível de otimização dos recursos da organização (Hiller e Libermann,1988).

2.3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para o estudo de programação linear é de suma importância o conceito de modelo matemático. Os modelos matemáticos constituem uma abstração simplificada da realidade, representada por um conjunto de equações e relações. A partir deste conceito simplificado, o modelo utiliza símbolos matemáticos para representar as variáveis de decisão do sistema real. Podemos afirmar que os processamentos computacionais são de fácil manipulação, a definição do modelo é a parte mais difícil para a solução do problema. (ARENALES, 2007)

A qualidade e eficiência do modelo matemático está associada à exatidão com que ele representa a realidade e ao grau em que captura aspectos essenciais da realidade. É importante saber selecionar o que é relevante para a composição do modelo. Embora não exista uma única fórmula para a modelagem de um problema, sugerimos as seguintes etapas: dividir o problema em problemas menores, se possível; identificar as variáveis de decisão; identificar possíveis relações entre as variáveis de decisão; identificar o objetivo (maximizar produção, minimizar custo) e construir a função objetivo; identificar os fatores restritivos (disponibilidade de recursos) e construir as restrições do modelo e; finalmente, construir o modelo matemático demonstrado na Figura 5. (ARENALES, 2007)

No modelo matemático da Figura 5, z é a função a ser otimizada; X_j as variáveis de decisão do problema; C_j o coeficiente da função objetivo; a_{ij} é a quantidade do produto i consumida na produção de uma unidade do produto j e bi é o nível de disponibilidade de recurso i ou quantidade mínima a ser suprida (i = 1,2,3, ... ,m) e (j = 1,2,3 ,... ,n). A solução do modelo matemático da Figura 6 consiste em encontrar valores adequados das variáveis de decisão que otimizem o desempenho do sistema, segundo o critério desejado A sua solução deve ser testada para a verificação da sua veracidade. Se a solução não atender, aproximadamente, a realidade o modelo deve ser reformulado, adicionando e/ou eliminando hipóteses.

Figura13: Modelo matemático para otimização

$$Otimizar\ z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$$

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \ \{=, \leq, \geq\} \ b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \ \{=, \leq, \geq\} \ b_2 \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2} + \cdots + a_{mn}x_n \ \{=, \leq, \geq\} \ b_m \end{cases}$$

Fonte: Arenales *et al.* (2007)

A confiabilidade da solução obtida através do modelo depende da validação do modelo na representação do sistema real. A validação do modelo é a confirmação de que ele realmente representa o sistema real. A diferença entre a solução real e a

solução proposta pelo modelo depende diretamente da precisão do modelo em descrever o comportamento original do sistema.

Um problema simples pode ser representado por modelos também simples e de fácil solução. Já problemas mais complexos requerem modelos mais elaborados, cuja solução pode vir a ser bastante complicada. (TAHA, 2008)

2.3.4 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

Atualmente existem diversos softwares no mercado para solução de problemas de programação linear, incluindo o GAMS, AMPL, AIMMS, softwares de planilhas eletrônicas como o Solver do Excel, dentre outros.

Os softwares GAMS (General Algebraic Modeling System), AMPL (A Mathematical Programming Planning) e AIMMS (Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software) são linguagens ou sistemas de modelagem algébrica, isto é, linguagens de programação de alto nível utilizadas para a solução de problemas de programação matemática complexos e de larga escala. Essas linguagens possuem uma interface aberta que possibilita a conexão com diversos pacotes de otimização ou que encontram a solução (solver) do modelo. Esses pacotes de otimização também podem ser utilizados de forma isolada, mas muitos deles costumam rodar dentro de um ambiente de desenvolvimento.

O software GAMS desenvolvido pela empresa GAMS Development Corporation, é um sistema de modelagem algébrica de alto nível que vem sendo utilizado para solução de problemas matemáticos complexos e de grande porte de programação linear, não linear e inteira. Ele possui interface que se conecta com vários pacotes de otimização. Uma versão livre do software pode ser baixada no sitio http://www.gams.com.

2.4 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Como já foi apresentado todo o estudo sobre a produção agrícola da cana-de-açúcar, bem como foi realizado um estudo sobre todas as variáveis, atores desse processo, e, foi também estudado o processo produtivo do etanol na visita realizada nas 3 (três) usinas, e, a partir daí criada uma planilha com todas as variáveis e os dados coletados de 101 semanas de estudo, pode-se iniciar o modelo matemático.

A modelagem matemática é caracterizada por construir modelos simplificados de sistemas reais a partir da integração de equipes multidisciplinares com o intuito de sintetizar, apresentar e analisar os diversos aspectos produtivos. Devido ao complexo número de interações envolvidas no processo produtivo, pode-se considerar a elaboração de modelos um processo lento e que geralmente contém bancos de dados de várias áreas, sendo isto de fundamental importância para que modelos realísticos possam ser desenvolvidos (BERNARDES, 2000).

Ainda segundo Bernardes (2000), os modelos são uma simplificação da realidade e devem possuir uma quantidade suficiente de detalhes de maneira que os resultados atinjam seus objetivos, sejam consistentes com os dados disponíveis e seja modelado, interpretado e concluído no tempo disponibilizado. Em outras palavras, cabe ao formulador ter o feeling para reproduzir fielmente as variáveis e a correta definição da função que as mesmas assumem dentro dos sistemas.

Os modelos matemáticos classificam-se também quanto ao tipo de equações que o constituem (lineares e não lineares); ao grau de estimativas ou descrição (empíricos e mecanistas); à forma com que são tratadas as mudanças ocorridas em relação ao tempo físico (dinâmicos e estáticos) e; ao nível de incerteza existente entre suas variáveis e parâmetros (probabilísticos e determinastas) (CAIXETA FILHO, 2000).

Segundo Lachtermacher (2007), modelos empíricos podem também serem chamados de “Caixa Preta”. É uma maneira simples de representar um modelo matemático porque procura estimar a resposta com base nas informações de entrada sem explicar o funcionamento de tal interação. Além do mais, o modelo utiliza apenas variáveis de decisão (explicativas), parâmetros, medidas de performance e consequências. O fator de grande relevância desse modelo é sua importância como instrumento na organização inicial do modelo, identificando as variáveis e auxiliando no entendimento da complexidade do sistema.

Os modelos mecanistas analisam e explicam as mudanças que ocorrem no sistema em resposta às alterações nas variáveis, nas equações, nas inequações e nas interações entre os elementos. Sendo, portanto, caracterizados como modelos baseados em relações de causa e efeito. Os modelos dinâmicos são caracterizados por incluírem o tempo físico entre suas variáveis, aonde todo o processo ocorre em função desta variável. Já os estáticos não consideram a variável tempo na elaboração do modelo. Por fim, os modelos estocásticos levam em consideração o risco e/ou a probabilidade na tomada de decisão, enquanto os modelos determinísticos não

incluem variáveis aleatórias e nem incorporam o risco em suas variáveis de decisão. Essas classificações tem a finalidade de organizar os objetivos dos modelos e atender da melhor maneira as necessidades dos usuários (MEDEIROS, 2003).

Assim, um modelo matemático de otimização consiste em uma representação do problema real a ser resolvido, o qual deve apresentar as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições, podendo ser construído com funções estritamente lineares ou também incluir funções não lineares.

A Programação Linear é uma das técnicas da Pesquisa Operacional mais consagradas na literatura para dar solução aos problemas lineares restritos de otimização. Os problemas de Programação Linear (PL) buscam a distribuição e ou alocação eficiente de recursos para atender um objetivo, seja de maximizar lucros, minimizar custos ou maximizar o desempenho de processos e de produtos. O modelo deve ser expresso através de um conjunto de funções lineares, constando de uma função objetivo e das restrições que limitam a busca do ótimo.

Para a elaboração das restrições do modelo representativo de um problema, é necessário identificar quais são os recursos requeridos para os processos de produção e ou produtos, bem como as quantidades demandadas para cada operação dos processos ou unidade dos respectivos produtos, expressas na forma de equações e ou inequações, as quais são todas lineares quando se trata de um problema de programação linear.

O que se busca ao solucionar um problema PL é a otimização da função objetivo, que pode ser: a maximização do lucro, a minimização dos custos, ou otimização dos processos e ou dos produtos. A essa solução dá-se o nome de solução ótima.

Para escrever um modelo matemático representativo de um problema real de otimização, é necessário:

a) Determinar as variáveis de decisão do problema;
b) Definir a função-objetivo, que é a expressão que calcula o valor do objetivo utilizando as variáveis de decisão, sendo lineares no caso da PL;
c) Definição das funções de restrições que, no caso da PL, expressam as relações lineares de igualdade ou desigualdade envolvendo as variáveis de decisão do problema.

Uma vez delineado o modelo matemático representativo do problema real que se pretende resolver, é necessário buscar um método ou um conjunto de métodos para atingir a solução ótima, que consistem em métodos determinísticos, sem a incorporação de fatores probabilísticos.

O fato dos métodos da Programação Linear ou Não Linear não incorporarem fatores probabilísticos, não impedem que problemas reais que envolvem risco não sejam trabalhados com a Programação Linear, pois, o tratamento probabilístico pode ser considerado a partir da geração de cenários vários, desde os mais pessimistas até os mais otimistas. E então, as probabilidades de ocorrência desses cenários podem ser consideradas como um trabalho de pós-otimização do problema determinístico.

A previsão para a elaboração deste trabalho é a de que o modelo matemático representativo do problema seja linear. O problema consiste na maximização do teor alcoólico do caldo resultante da moenda da usina processadora da cana-de-açúcar, considerando as influências do preparo do solo para plantio, do tratamento da lavoura no período de maturação, dos processos de colheita e de extração do caldo.

A elaboração do modelo matemático requer a compreensão detalhada do problema real, assim, cabe a questão: O que considerar para a elaboração do modelo matemático representativo do problema?

O problema real em questão consiste em chegar a um conjunto de ações desde a lavoura e até concluir a primeira etapa da industrialização que devem ser adotas para obter o máximo teor alcoólico do caldo. Para isso é necessário determinar quais variáveis devem ser consideradas e quais são os parâmetros precisam ser obtidos para escrever o modelo representativo do problema.

O uso de métodos para dar solução ao modelo matemático de Programação Linear permite atingir o ponto ótimo do problema, consistindo em indicativos para a tomada de decisão dos responsáveis pela execução dos processos e ou finalização dos produtos e ou serviços, mas o problema de Programação Linear pode consistir em variáveis contínuas, variáveis inteiras e variáveis binárias. Assim, com o desenvolver do trabalho, nenhuma dessas hipóteses pode ser descartada.

3 MATERIAL E METODOS

3.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA

De acordo com Cervo *et al.* (2007) o método é a ordem que deve impor os diversos processos para atingir o resultado esperado e depende do objetivo da pesquisa, com isso, é necessário que coloque no contexto o que realmente for alavancar conhecimento no trabalho.

Conforme Prodanov (2013), método científico é um conjunto de procedimentos que tem por finalidade atingir os conhecimentos desejados, sendo que em cada situação o método escolhido se adequa à necessidade do trabalho.

Segundo Kauark (2010) A escolha do tema para elaboração, a coleta de dados, os materiais a serem utilizados são fatores imprescindíveis de uma pesquisa, para otimização dessas fases, é necessário que obtenha um bom planejamento das etapas em questão.

Para que o trabalho acrescente conhecimentos positivos é importante ter um planejamento sobre a elaboração e escolher as ferramentas necessárias para a otimização do mesmo.

De acordo com Lakatos (2012) a pesquisa bibliográfica permite explorar novas áreas, aprofundar conhecimento em áreas já conhecidas e pode ser considera como o passo inicial para qualquer pesquisa cientifica.

Este trabalho então, para um melhor resultado e mais organizado foi dividido em 5 etapas. Na primeira etapa, foi estudada a cana-de-açúcar e todo o seu processo agrícola, desde a escolha das variedades até a colheita, identificando todos os fatores que interferem direta ou indiretamente no processo de produção agrícola da cana-de-açúcar, como clima, solo, chuva/irrigação, adubação, calagem, variedade de espécies, sistema de plantio, sistema de colheita, uso de maturadores químicos e pragas. Esses fatores foram selecionados em visitas aos produtores que fornecem a cana-de-açúcar para ser processada em 3 usinas que compreendem a região nordeste de São Paulo e Triângulo Mineiro. Todas as variáveis foram coletadas em forma de dados e inseridas em uma planilha que considera a média mensal.

A coleta foi feita em 101 semanas, compreendendo plantio e produção. A segunda etapa então corresponde ao estudo de todo o processo de produção de etanol da cana-de-açúcar por essas 3 usinas de portes diferentes. Toda etapa de

produção foi identificada como variáveis fatores do processo, como a Recepção e Preparo, Moagem, Tratamento do Caldo, Fermentação e Destilação. Para analisar essa etapa utilizou-se a Usina Santa Elisa como modelo base para as 3 usinas estudadas.

A terceira etapa corresponde às análises laboratoriais durante o mesmo período de 101 samanas de estudo. Essas análises mostram a qualidade do caldo da cana processada, como ºbx, pH, pureza, POL, ART, Fibras, teor alcóolico e rendimento do etanol. Todas as análises laboratoriais, bem como todos os dados coletados na etapa 1 foram inseridos na mesma planilha de média mensal.

Na quarta etapa todas as variáveis foram analisadas e preparadas para serem utilizadas no modelo matemático. Essa preparação ocorreu primeiro utilizando o Software IBM© SPSS©Statistics versão 23.0 para identificar o comportamento das variáveis e qual tipo de regressão, linear ou não-linear. Depois como o mesmo software foi feita uma análise estatística multivariada para identificar a correlação entre as variáveis, e, preparar para o uso no modelo matemático.

A quinta etapa corresponde à modelagem matemática. Depois de estudar os processos de produção da cana-de-açúcar e de produção de etanol da cana-de-açucar, as variáveis foram identificadas, selecionadas, preparadas e validadas estatisticamente para o uso no modelo. Assim, o modelo foi criado e validado utilizando o software GAMS. O objetivo principal dele é identificar qual a relação entre as variáveis que consegue obter o máximo rendimento em litros de etanol por tonelada de cana processada e o maior valor do teor alcóolico do caldo do mosto. E, como no referencial teórico já foi apresentado o estudo sobre a cana-de-açúcar e sua produção agrícola, agora será apresentado o estudo e mapeamento realizado nas usinas sobre o processamento da cana-de-açúcar e produção de etanol, pois já faz parte do desenvolvimento realizado nas 3 usinas visitadas.

3.2 ELABORAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Para realização deste trabalho foram coletados dados de plantio, colheita, produção até obtenção do caldo do mosto, para obtenção do teor alcóolico da cana-de-açúcar processada e avaliar o rendimento em etanol por litro de etanol por tonelada de cana processada. As implementações computacionais foram utilizando os

softwares IBM© SPSS©Statistics versão 23.0; GAMS© versão 24.7.1 e Microsoft Excel 2016.

A seguir são apresentados os modelos matemáticos desenvolvidos, com o objetivo de maximizar o rendimento do etanol em litros por tonelada de cana processada num período de análise equivalente a 100 semanas. Denotando por xij a variável do modelo que determina o teor alcoólico i a ser obtidodo caldo do mosto na moenda na batelada j e yjt a variável que determina a quantidade em litros de etanol t em que será obtido do caldo do mosto na moenda na batelada j. E, a base de cálculo para todas as variáveis e o modelo é uma média que equivale a uma tonelada de canas processadas na moenda em uma batelada.

Tendo discutido o processo de produção das usinas de cana-de-açúcar, apontado as principais questões de modelagem do problema, são descritos uma série de parâmetros, os quais assumem ser lineares em razão do nível de análise desejado, e, conforme análise feita no software IBM© SPSS©Statistics versão 23.0 que determinou na relação das variáveis com o teor alcóolico obtido no mosto e analisado em laboratório no processo subsequente à intervenção da variável dentro da batelada de uma tonelada de cana processada.

3.2.1 ÍNDICES DO MODELO MATEMÁTICO

São os índices que descrevem as variáveis do problema, que no Software GAMS© versão 24.7.1 são chamados de ***SET***.

Nesse modelo, houve a divisão dos SET´s ou índices de acordo com o tipo de variável: contínua, inteira ou binária.

- "i": índice com as variáveis binárias sendo a variedade da cana (2 tipos de cultivares (A ou B) utilizados pelos produtores das 3 usinas), sistema de plantio (direto ou convencional), uso de maturadores químicos (uso ou não de maturadores), tipo de solo (2 tipos (A ou B) na região do noroeste do estado de São Paulo e no Triângulo Mineiro, no que abrange as 3 usinas), adubação (uso ou não de Correção de solo com NPK) e sistema de colheita (mecanizada ou manual);

- "j": índice com as variáveis contínuas dos dados laboratoriais obtidos nas usinas no processamento da cana sendo o pH do caldo do mosto, pol, ART, pureza e fibra;
- "k": índice com as variáveis contínuas dos dados laboratoriais obtidos nas usinas no processamento da cana sendo teor alcoólico do mosto e o rendimento em litros de etanol por tonelada de cana processada.

3.2.2 PARÂMETROS DO MODELO MATEMÁTICO

São os valores assumidos de acordo com a análise estatística utilizando o software IBM© SPSS©Statistics versão 23.0 e o Microsoft Excel 2016, os quais vão definir cada variável dos índices, parametrizando os mesmos.

- ***Calc***: Definição do tipo de calcário utilizado no plantio para calagem do solo, com opção de 85% ou 100%;
- ***Vari***: Definição da variedade de cana utilizada no plantio, com opção de RB925345 ou RB935744;
- ***Plant***: Sistema de plantio, com opção de Direto ou Convencional;
- ***Matu***: Uso ou não de maturadores químicos no plantio;
- ***Solo***: Definição do tipo de solo (região noroeste de São Paulo ou região do Triângulo Mineiro);
- ***Adub***: Uso ou não de correção de solo com NPK de acordo com Tabela adequada ao tipo de solo;
- ***Colh***: Sistema de colheita com opção de ser mecanizada ou manual;
- ***pH***: pH do caldo do mosto obtido no processamento da cana na usina durante uma batelada;
- ***pol***: Quantidade de açúcar obtido do caldo do mosto obtido no processamento da cana em uma solução açucarada em %;
- ***Bmf***:ºbx do mel final adotado pela fábrica;
- ***ART***: Açúcares redutores totais do caldo do mosto obtido no processamento da cana em toneladas por hora;
- ***Purz:*** Pureza da cana processada na usina em %;

- ***Fib:*** Quantidade de fibra obtido do caldo do mosto obtido no processamento da cana em toneladas por hora;
- ***Talc:*** Teor alcóolico obtido do caldo do mosto obtido no processamento da cana em %/ºbx;
- ***Rend:*** Rendimento do processamento da cana na usina em litros de etanol por tonelada de cana processada.

3.2.3 FUNÇÃO OBJETIVO E VARIÁVEIS DE DECISÃO DO MODELO MATEMÁTICO

As variáveis de decisão são um conjunto de variáveis manipuláveis no procedimento de busca pelo ótimo, que como objetivo do trabalho é obtenção do máximo de teor alcóolico e de rendimento de etanol para uma tonelada de cana processada na usina.

- $X_{i,j}$: Variável de decisão do teor alcóolico obtido na relação dos conjuntos i e j;
- Yi,j: Variável de decisão do rendimento de etanol obtido na relação dos conjuntos i e j;
- Z: Na linguagem GAMS é necessário informar uma variável que vai definir a função objetivo, neste caso chamado de Z, que vai definir os valores ótimos maximizando o resultado.

Na Equação 2 é apresentada a função objetivo do modelo proposto. Nela foi proposto maximizar o rendimento de etanol em litros de etanol por tonelada de cana processada do índicei que é o conjunto de fatores de interferência direta no processo de plantio da cana apresentados nos parâmetros definidos no capítulo 6.4.1.2, e, do índice j, que é o conjunto de fatores determinantes da qualidade do caldo do mosto da cana processada na usina, obtidos em análise laboratorial, sendo todos para uma batelada de cana que corresponde a uma tonelada de cana processada.

$$Max(Z) = (\sum_{i=1}^{\infty}(XI) * (Yi) * (i)) + \left(\sum_{j=1}^{\infty}(Xj) * (Yj) * (j)\right) \qquad \text{EQUAÇÃO 2}$$

As restrições do modelo são equações e inequações que vão determinar os limites de cada variável do modelo matemático, restringindo o cálculo na solução do problema.

Para o índice i:

$$Vari = 1 \; ou \; Vari = 0$$
$$Plant = 1 \; ou \; Plant = 0$$
$$Matu = 1 \; ou \; Matu = 0$$
$$Solo = 1 \; ou \; Solo = 0$$
$$Adub = 1 \; ou \; Adub = 0$$
$$Calc = 1 \; ou \; Calc = 0$$
$$Colh = 1 \; ou \; Colh = 0$$

Para o índice j:

$$pH \geq 5{,}2 \; e \; pH \leq 5{,}7$$
$$Pol \geq 14$$
$$Bmf \geq 15$$
$$Art \geq 100$$
$$Purz \geq 0{,}85$$
$$Fib \geq 100$$

Para todos os índices i e j:

$Xi, j \geq 0$ (não negatividade)

$Yi, j \geq 0$ (não negatividade)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos no capítulo anterior. Como a proposta do trabalho foi de elaborar um modelo matemático para maximizar o teor alcóolico e elevar o rendimento do etanol em litros por tonelada de cana processada na usina, tal modelo foi validado e executado para testar e simular seus resultados.

4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE 3 USINAS AMOSTRADAS

Os dados foram levantados em 3 usinas na região do Triângulo Mineiro e a Região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, uma área de aproximadamente 500 km de raio, com clima e solos adequados, onde se encontram as melhores práticas agrícolas para a obtenção de elevados rendimentos da cana-de-açúcar no processo de industrialização visando a obtenção do produto Etanol. Essas práticas que vão desde a escolha do cultivar, o preparo do solo, o plantio, a adubação de cobertura, a utilização de defensivos e maturadores químicos e o tipo de colheita.

Para a obtenção desses dados foi necessário o acompanhamento da plantação e do processo produtivo, para a compreensão do problema, e a coleta do registro das análises laboratoriais num período de um ano e meio entre 2014 e 2016.

Os dados obtidos foram compilados em Tabela e depois foi feita uma média aritmética de todos os dados de todas as 3 usinas, conforme está apresentado nas Tabelas de 3 a 5.

Tabela 3: Dados do Processo de Plantação e Colheita da Cana

Cultivares utilizados	Chuva (mm)	Canapicada queimada?	Tempo de queima (horas)	Correção do Solo?	Maturadores químicos?
RB925345, RB935744	19,71	Sim	52,46	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4: Dados obtidos no Laboratório PCTS das Usinas

Kg Terra / tonelada de cana %	pH Caldo da cana	POL %	ART Kg/ton	Pureza PCTS %	Teor Alcoólico Caldo PCTS %/ºBx
5,78	5,20	15,57	138,61	83,23	0,307

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5: Dados obtidos no Laboratório PCTS das Usinas - continuação

Cana Moída ton./hora	ART - moenda Ton. /Hora	Pureza do Mosto %	Fibra Moenda Ton./hora	Teor Alcoólico do Mosto %/ºBx	Rendimento l de etanol / ton. de cana
942	150	65	129	0,546	89

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados foram coletados com base em uma semana de trabalho das Usinas e compilados em uma Tabela macro que está no Apêndice A.

Vale saber também que os dados laboratoriais foram feitos pelos laboratórios PCTS (Pagamento de Cana por Teor de Sacarose) das usinas e a nomenclatura adequada está a seguir:

- **Grau ºBx:** é a palavra aplicada por toda a indústria. É uma escala numérica que mede a quantidade de sólidos solúveis em uma solução açucarada. O ºbx é aferido por um aparelho chamado refratômetro. Sua escala foi derivada originalmente da escala de Balling, recalculando a temperatura de referência de 15,5 ºC. É importante dizer que essa escala é usada em todas as indústrias de alimento.
- **Pol:** é a quantidade de açúcar contido em uma solução açucarada.
- **Pureza:** é a razão da Pol sobre o Brix vezes 100. Exemplo: Se a cana apresentam 14 de Pol e 16 ºbx, fazendo a divisão e multiplicando por 100 o resultado será de uma cana com Pureza = 87,5. O padrão de pureza ideal é de >85%
- **AR:** são os Açúcares Redutores, ou seja, aqueles que não se cristalizam, sendo eles glicose e frutose. Na fábrica de Açúcar quanto menos AR melhor. Na destilaria quanto mais AR melhor.

- **ART:** são os Açúcares Redutores Totais, ou seja, os três tipos de açúcares existentes na cana: glicose, frutose e sacarose.
- **pH:** é o potencial Hidrogeniônico de qualquer solução. Essa escala que varia de 0 a 14 nos informa como está a solução: ácida, básica ou neutra. pH de 0 a 6,9 a solução está ácida. pH de 7 é uma solução neutra. pH 7,1 a 14 a solução está básica. O importante é que o pH das canas estejam de 5,2 a 5,5, portanto o caldo de cana é um líquido ácido, abaixo disso o caldo está se deteriorando.
- **Fibra:** matéria seca, insolúvel em água, que está contida na cana. Muitas pessoas confundem Fibra e Bagaço, mas são duas coisas diferentes.

Dessa forma dá-se para estabelecer as variáveis do problema em questão.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROBLEMA

Para a correta divisão das variáveis do problema, houve a necessidade de identificação e caracterização de todo o processo da cana-de-açúcar:

a) Cana Ambiente: Significa toda a etapa de plantio.
   - Chuva /ou irrigação;
   - Tipos de solo;
   - Escolha da variedade;
   - Calagem;
   - Adubação;
   - Sistema de plantio;
   - Uso de maturadores químicos;
   - Sistema de colheita;

b) Cana Preparada: Significa toda a etapa de recepção, preparo e moagem.
   - Recepção, preparo e corte da cana;
     - Kg de terra / ton de cana
     - pH do caldo da cana
     - Pol: quantidade de açúcar obtido em uma solução açucarada em %

- ART – açúcares redutores totais em kg/ton de cana
- Pureza da cana em %
- Teor alcoólico da cana em %/Brix

- Moendas;
  - Ton de cana moída por hora;
  - Ton de ART por hora;
  - Ton de Fibra por hora;
  - Pureza do mosto em %;
  - Teor Alcoólico do mosto em %/Brix
  - Rendimento do processo em litro de etanol / ton de cana processada

Portanto, o modelo matemático deverá conter essas variáveis como sendo variáveis de decisão ou variáveis de restrição para a função descrita na Equação 3:

$$Q(x) = \propto 1.X1 + \propto 2.X2 + \cdots + \propto n.Xm \qquad \text{EQUAÇÃO 3}$$

As variáveis podem ser continuas, inteiras ou binárias.

- Variáveis Inteiras: Adubação e calagem.
- Variáveis Contínuas: Chuva, tipos de solo, recepção e corte da cana, moendas.
- Variáveis Binárias: Variedade da cana, sistema de plantio, maturadores, sistema de colheita.

4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS

Serão determinadas aqui as relações entre cada variável identificada e o resultado do seu comportamento na obtenção do Teor Alcóolico do Mosto na Usina, onde foram feitas análises laboratoriais durante 101 semanas, e, a relação tem como base 01 (uma) tonelada de cana processada representando uma batelada nas usinas analisadas.

Essas relações identificarão se as variáveis têm relação linear ou não linear com o comportamento do Teor Alcóolico do Mosto das Usinas e determinarão se o Problema é de Programação Linear ou de Programação Não Linear.

A metodologia utilizada foi de avaliar durante 101 semanas em 3 usinas o comportamento das variáveis e coletar amostras durante uma tonelada de cana

processada nas usinas e fazer análise laboratorial relacionando com o teor alcóolico em %/ºbx para a mesma tonelada processada. Assim foram feitas médias aritméticas dos resultados das variáveis das 3 usinas, elaborada uma Tabela com todas semanas e os resultados do teor alcóolico, e, esses dados utilizados no programa de estatística IBM© SPSS©Statistics versão 23.0. No programa houve como determinar a linearidade ou não das variáveis.Na Tabela 6 mostra a relação das variáveis com o teor alcoólico para o período indicado.

Tabela 6: Relação das Variáveis com o teor alcoólico em %/Brix para uma tonelada de cana processada

Semana	Chuva 19 mm e/ou irrigação	Fertilização Solo (Uso de adubação NPK)	Planio Direto	Calagem (Uso Calcario 85/100)	Colheita Mecanizada	Uso de Maturadores Químicos
1	0,309	0,509	0,310	0,400	0,309	0,300
2	0,200	0,600	0,200	0,600	0,200	0,600
3	0,400	0,650	0,400	0,750	0,400	0,300
4	0,250	0,550	0,250	0,650	0,250	0,500
5	0,300	0,200	0,300	0,520	0,300	0,250
6	0,600	0,400	0,600	0,320	0,600	0,400
7	0,300	0,600	0,300	0,490	0,300	0,120
8	0,500	0,750	0,500	0,500	0,500	0,200
9	0,250	0,650	0,250	0,600	0,250	0,119
10	0,400	0,519	0,400	0,280	0,400	0,200
11	0,119	0,319	0,120	0,500	0,119	0,290
12	0,200	0,490	0,200	0,450	0,200	0,380
13	0,290	0,500	0,290	0,500	0,290	0,064
14	0,380	0,600	0,380	0,330	0,380	0,095
15	0,064	0,280	0,060	0,370	0,064	0,610
16	0,095	0,500	0,100	0,500	0,095	0,280
17	0,610	0,450	0,610	0,600	0,610	0,500
18	0,500	0,500	0,500	0,450	0,500	0,450
19	0,139	0,330	0,140	0,800	0,139	0,500
20	0,191	0,365	0,190	0,770	0,191	0,330
21	0,174	0,500	0,500	0,300	0,174	0,370
22	0,586	0,600	0,600	0,130	0,586	0,500
23	0,620	0,450	0,450	0,140	0,620	0,600
24	0,520	0,800	0,800	0,310	0,520	0,450
25	0,570	0,770	0,770	0,700	0,570	0,500

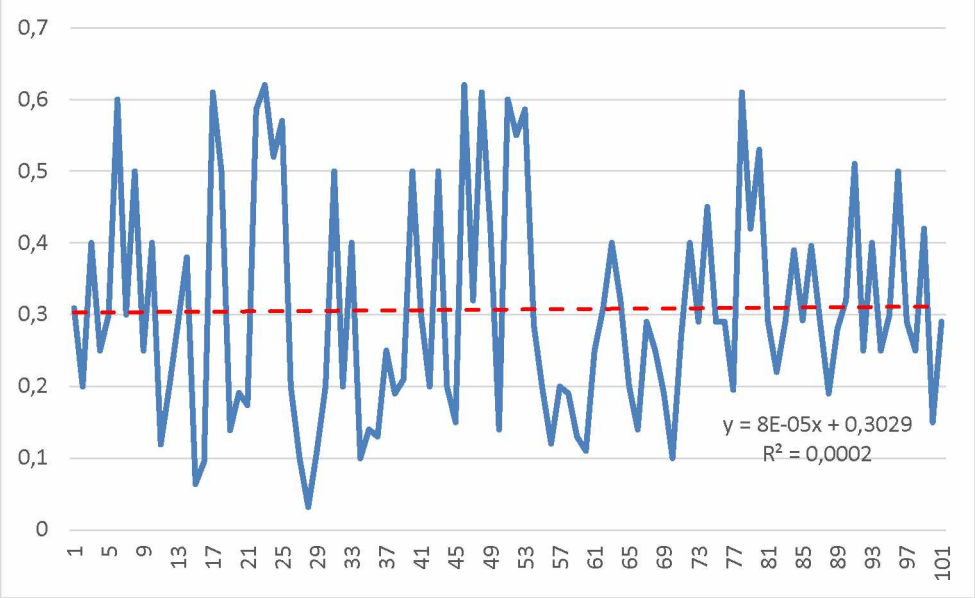
26	0,200	0,300	0,300	0,200	0,200	0,600
27	0,100	0,132	0,130	0,100	0,100	0,450
28	0,032	0,142	0,140	0,030	0,032	0,800
29	0,110	0,310	0,310	0,110	0,110	0,310
30	0,200	0,700	0,700	0,200	0,200	0,700
31	0,500	0,700	0,700	0,500	0,500	0,700
32	0,200	0,600	0,600	0,200	0,200	0,600
33	0,400	0,500	0,500	0,400	0,400	0,500
34	0,100	0,240	0,240	0,100	0,100	0,240
35	0,140	0,270	0,270	0,140	0,140	0,270
36	0,130	0,380	0,380	0,130	0,130	0,380
37	0,250	0,440	0,440	0,250	0,250	0,440
38	0,190	0,400	0,400	0,190	0,190	0,400
39	0,210	0,710	0,710	0,210	0,210	0,710
40	0,500	0,800	0,800	0,310	0,500	0,800
41	0,300	0,500	0,500	0,700	0,300	0,500
42	0,200	0,700	0,700	0,700	0,200	0,700
43	0,500	0,700	0,700	0,600	0,500	0,700
44	0,200	0,350	0,350	0,500	0,200	0,350
45	0,150	0,770	0,770	0,240	0,150	0,320
46	0,620	0,940	0,940	0,270	0,620	0,610
47	0,320	0,930	0,930	0,380	0,320	0,420
48	0,610	0,500	0,500	0,440	0,610	0,140
49	0,420	0,560	0,560	0,400	0,420	0,600
50	0,140	0,740	0,740	0,710	0,140	0,550
51	0,600	0,600	0,600	0,800	0,600	0,586
52	0,550	0,500	0,500	0,500	0,550	0,286
53	0,586	0,872	0,870	0,700	0,586	0,196
54	0,286	0,482	0,480	0,700	0,286	0,120
55	0,196	0,316	0,320	0,350	0,196	0,190
56	0,120	0,320	0,320	0,770	0,120	0,130
57	0,200	0,390	0,390	0,940	0,200	0,110
58	0,190	0,320	0,320	0,930	0,190	0,250
59	0,130	0,240	0,240	0,500	0,130	0,309
60	0,110	0,360	0,360	0,560	0,110	0,360
61	0,250	0,559	0,250	0,740	0,250	0,559
62	0,309	0,709	0,310	0,600	0,309	0,709
63	0,400	0,720	0,400	0,430	0,400	0,720
64	0,320	0,520	0,320	0,540	0,320	0,500
65	0,200	0,340	0,200	0,440	0,200	0,360

66	0,140	0,430	0,140	0,290	0,140	0,250
67	0,290	0,540	0,290	0,370	0,290	0,310
68	0,250	0,440	0,250	0,670	0,250	0,400
69	0,190	0,290	0,190	0,690	0,190	0,320
70	0,100	0,370	0,100	0,740	0,100	0,200
71	0,270	0,670	0,270	0,740	0,270	0,140
72	0,400	0,690	0,400	0,580	0,400	0,290
73	0,290	0,740	0,290	0,490	0,290	0,740
74	0,450	0,740	0,450	0,810	0,450	0,740
75	0,290	0,580	0,290	0,500	0,290	0,580
76	0,290	0,485	0,290	0,600	0,290	0,485
77	0,195	0,805	0,200	0,290	0,195	0,805
78	0,610	0,500	0,610	0,220	0,610	0,600
79	0,420	0,600	0,420	0,290	0,420	0,950
80	0,530	0,820	0,530	0,390	0,530	0,820
81	0,290	0,510	0,290	0,290	0,290	0,510
82	0,220	0,510	0,220	0,400	0,220	0,500
83	0,290	0,680	0,290	0,290	0,290	0,680
84	0,390	0,682	0,390	0,190	0,390	0,682
85	0,292	0,688	0,290	0,280	0,292	0,688
86	0,396	0,686	0,400	0,320	0,396	0,686
87	0,290	0,480	0,290	0,190	0,290	0,480
88	0,190	0,470	0,190	0,280	0,190	0,470
89	0,280	0,600	0,280	0,320	0,280	0,600
90	0,320	0,830	0,320	0,510	0,320	0,830
91	0,510	0,760	0,510	0,250	0,510	0,760
92	0,250	0,650	0,250	0,400	0,250	0,650
93	0,400	0,650	0,400	0,250	0,400	0,650
94	0,250	0,550	0,250	0,300	0,250	0,550
95	0,300	0,800	0,300	0,500	0,300	0,800
96	0,500	0,790	0,500	0,290	0,500	0,790
97	0,290	0,540	0,290	0,290	0,290	0,540
98	0,250	0,670	0,250	0,450	0,250	0,670
99	0,420	0,570	0,420	0,290	0,420	0,570
100	0,150	0,440	0,150	0,290	0,150	0,510
101	0,290	0,400	0,290	0,200	0,290	0,250
Média	0,307	0,546	0,393	0,433	0,307	0,471
Maximo	0,620	0,940	0,940	0,940	0,620	0,950
Minimo	0,032	0,132	0,060	0,030	0,032	0,064

Fonte: Elaborado pelo autor.

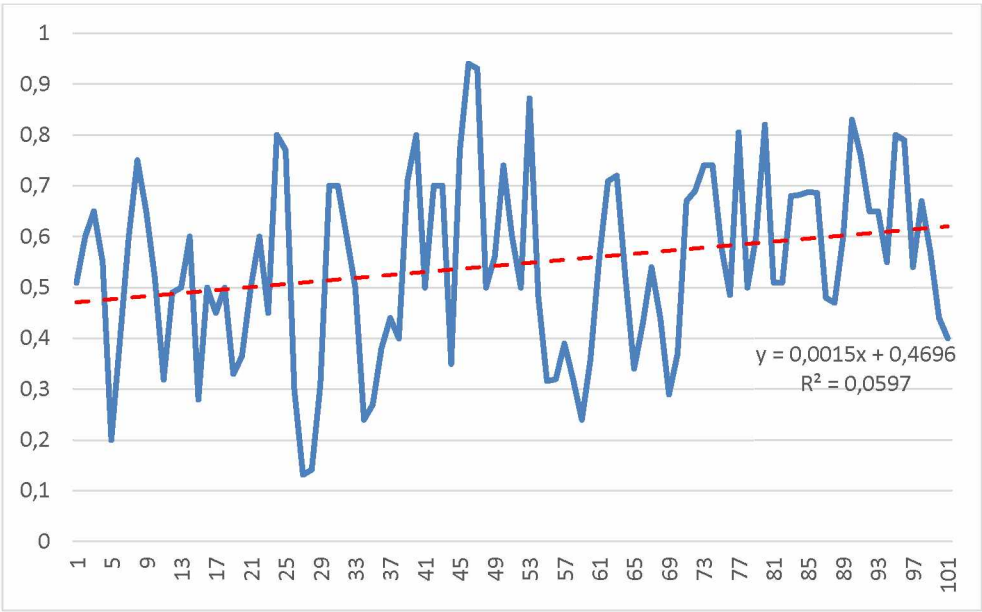
Como resultado dos dados obtidos no software IBM© SPSS©Statistics versão 23.0 tem-se os gráficos representados pelas Figuras de 14 a 19 a seguir.

Figura14: Gráfico da relação da tendência da variável Umidade (irrigado e/ou chuva) com o teor alcoólico obtido no mosto para uma tonelada de cana processada



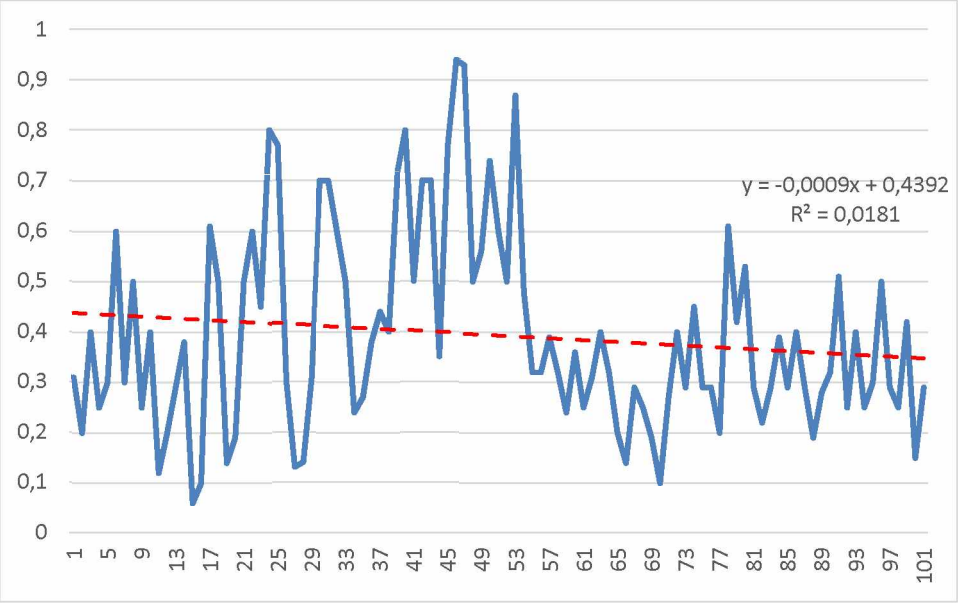
Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Figura15: Gráfico da relação da tendência da variável Adubação do Solo com o teor alcoólico obtido no mosto para uma tonelada de cana processada



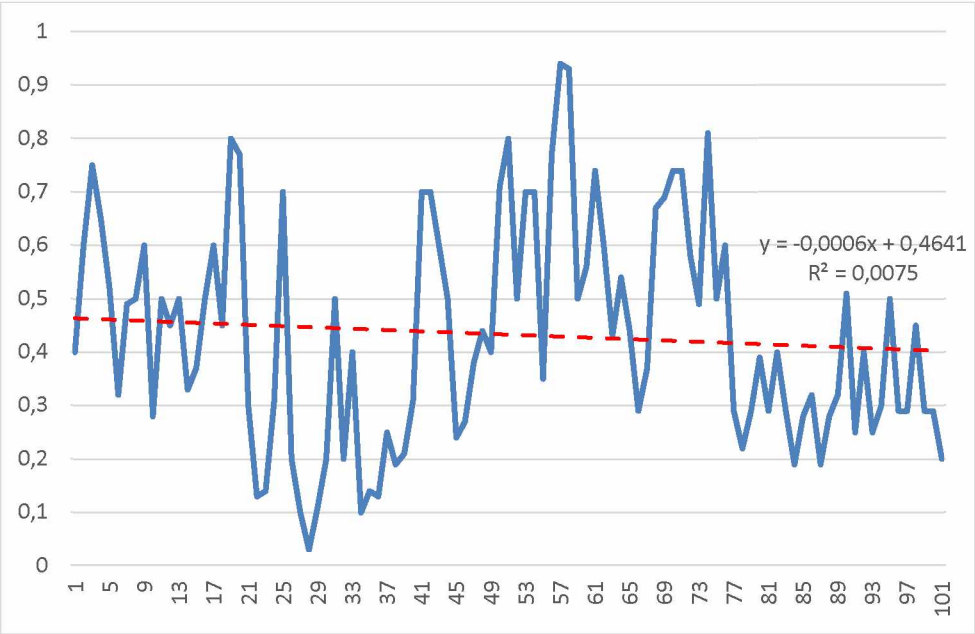
Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Figura16: Gráfico da relação da tendência da variável Plantio Direto com o teor alcoólico obtido no mosto para uma tonelada de cana processada



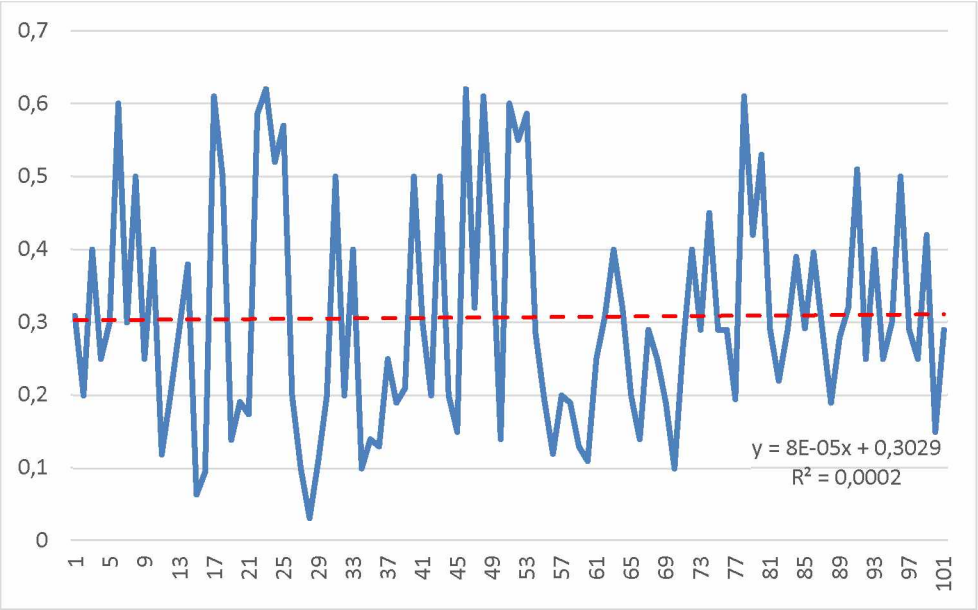
Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Figura17: Gráfico da relação da tendência da variável Calagem (com uso de calcário 85/100) com o teor alcoólico obtido no mosto para uma tonelada de cana processada.



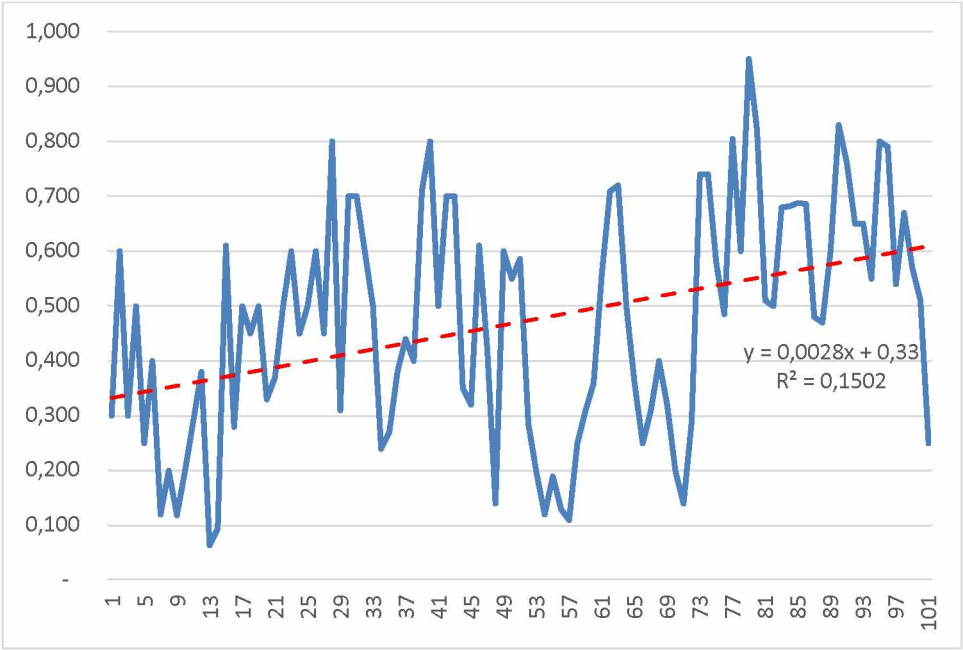
Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Figura18: Gráfico da relação da tendência da variável Colheita Mecanizada com o teor alcoólico obtido no mosto para uma tonelada de cana processada.



Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Figura19: Gráfico da relação da tendência da variável Maturadores Químicos com o teor alcoólico obtido no mosto para uma tonelada de cana processada.



Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Com base nos resultados obtidos e acompanhando a análise gráfica pode-se determinar que há uma relação linear entre as variáveis e o teor alcoólico obtido no mosto das usinas para cada uma tonelada de cana processada. Sendo assim determina-se que o modelo matemático deverá seguir a Programação Linear (PL).

4.4 CORRELAÇÃO ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Segundo Favero (2009) e Bruni (2009), a Análise de Correspondência (ANACOR) é uma técnica primariamente descritiva e visual, projetada para analisar Tabelas de contingência que contenham alguma medida de associação entre as linhas e colunas (variáveis) e para algumas situações essa técnica pode assumir um caráter exploratório. Dados categóricos são as entradas mais comuns para se iniciar o tratamento e análise, porém dados contínuos podem ser utilizados caso possam ser categorizados. Essa análise é utilizada apenas para duas variáveis por vez.

Já a Análise de Correspondência Multipla (MCA – *Multiple Correspondence Analysis*) também é uma técnica primariamente descritiva e visual, que é utilizada para o estudo das relações entre duas ou mais variáveis nominais ou ordinais. Um gráfico bidimensional (*Bipilot*), normalmente permite uma análise mais compreensível dos dados.

Então, as variáveis da Tabela 7 foram analisadas com o método de Análise de Correspondência Multipla do software IBM© SPSS©Statistics versão 23.0, com o objetivo de identificar suas correlações e força de atração para garantir seu uso no Modelo Matemático desenvolvido.

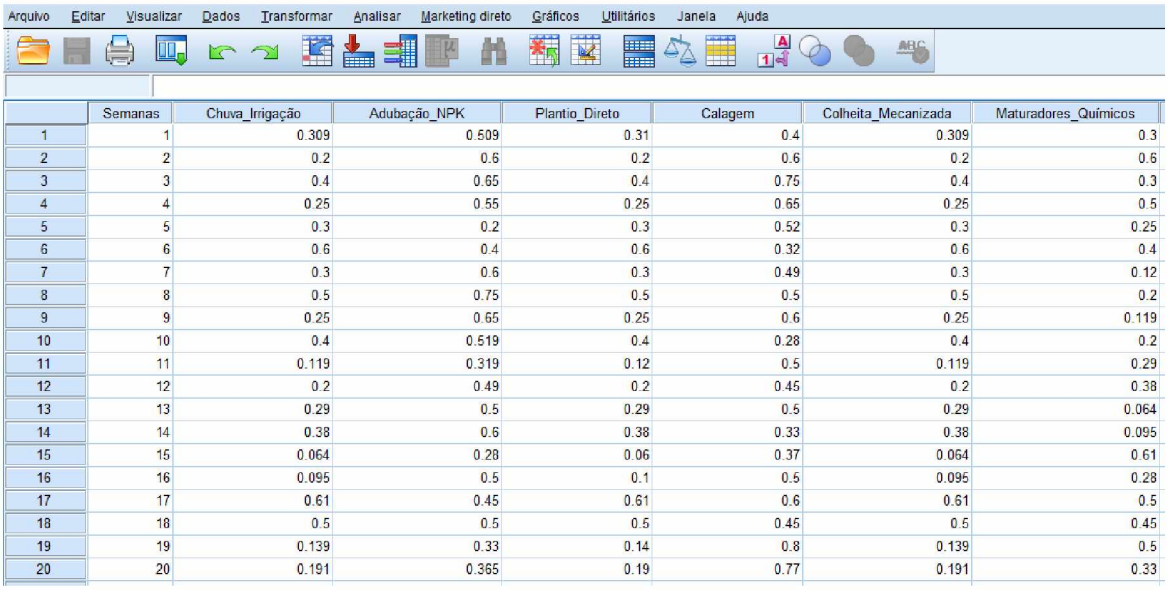
Para tanto, as variáveis foram inseridas na Planilha de tabulação do Software IBM© SPSS©Statistics versão 23.0 e foram preparadas para serem analisadas pelo método multivariado, conforme ilustram as Figuras 20 e 21.

Figura 20: Preparação das variáveis



	Nome	Tipo	Largura	Decimais	Rótulo	Valores	Omisso	Colunas	Alinhar	Medida	Papel
1	Semanas	Numérico	8	0		Nenhum	Nenhum	8	Direito	Escala	Entrada
2	Chuva_Irrigação	Numérico re...	28	0		Nenhum	Nenhum	16	Direito	Ordinal	Entrada
3	Adubação_NPK	Numérico re...	10	0		Nenhum	Nenhum	17	Direito	Ordinal	Entrada
4	Plantio_Direto	Numérico re...	15	0		Nenhum	Nenhum	15	Direito	Ordinal	Entrada
5	Calagem	Numérico re...	31	0		Nenhum	Nenhum	15	Direito	Ordinal	Entrada
6	Colheita_Mecanizada	Numérico re...	21	0		Nenhum	Nenhum	17	Direito	Ordinal	Entrada
7	Maturadores_Químicos	Numérico re...	29	0		Nenhum	Nenhum	19	Direito	Ordinal	Entrada

Figura 21: tabulação das variáveis



	Semanas	Chuva_Irrigação	Adubação_NPK	Plantio_Direto	Calagem	Colheita_Mecanizada	Maturadores_Químicos
1	1	0.309	0.609	0.31	0.4	0.309	0.3
2	2	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6
3	3	0.4	0.65	0.4	0.75	0.4	0.3
4	4	0.25	0.55	0.25	0.65	0.25	0.5
5	5	0.3	0.2	0.3	0.52	0.3	0.25
6	6	0.6	0.4	0.6	0.32	0.6	0.4
7	7	0.3	0.6	0.3	0.49	0.3	0.12
8	8	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5	0.2
9	9	0.25	0.65	0.25	0.6	0.25	0.119
10	10	0.4	0.619	0.4	0.28	0.4	0.2
11	11	0.119	0.319	0.12	0.5	0.119	0.29
12	12	0.2	0.49	0.2	0.45	0.2	0.38
13	13	0.29	0.5	0.29	0.5	0.29	0.064
14	14	0.38	0.6	0.38	0.33	0.38	0.095
15	15	0.064	0.28	0.06	0.37	0.064	0.61
16	16	0.095	0.5	0.1	0.5	0.095	0.28
17	17	0.61	0.45	0.61	0.6	0.61	0.5
18	18	0.5	0.5	0.5	0.45	0.5	0.45
19	19	0.139	0.33	0.14	0.8	0.139	0.5
20	20	0.191	0.365	0.19	0.77	0.191	0.33

Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

Após o preparo e tratativa das variáveis, o software faz a correlação entre as variáveis selecionadas, com distribuição normal, intervalo de confiança acima de 95%, Correlação de Pearson, cálculo do erro e covariância, conforme pode ser identificado nas Tabela 7..

Tabela 7: Saída de resultados do Software Gams da correlação entre as variáveis.

		Chuva /Irrigação	Adubação _NPK	Plantio _Direto	Calagem	Colheita Mecani-zada	Maturad ores_Quí micos
Chuva /Irrigação							
Correlação de Pearson		1	,519	,625	,014	1,000	,210
Sig. (bilateral)			,000	,000	,889	,000	,035
Soma dos quadrados e produtos cruzados		2,361	1,424	1,892	,045	2,361	,676
Covariância		,024	,014	,019	,000	,024	,007
N		101	101	101	101	101	101
Bootstrap[c]	Viés	0	-,003	,000	-,002	,000	,004
	Erro	0	,082	,077	,110	,000	,093
	Intervalo de Confiança 95%						
	Inferior	1	,340	,459	-,190	1,000	,031
	Superior	1	,666	,760	-,217	1,000	,393

Adubação_NPK							
Correlação de Pearson		,519	1	,595	,065	,519	,440
Sig. (bilateral)		,000		,000	,518	,000	,000
Soma dos quadrados e produtos cruzados		1,424	3,190	2,094	,241	1,424	1,643
Covariância		,014	,032	,021	,002	,014	,016
N		101	101	101	101	101	101
Bootstrap[c]	Viés	-,003	0	-008	-,002	-,003	,007
	Erro	,082	0	,067	,109	,082	,094
	Intervalo de Confiança 95%						
	Inferior	,340	1	,434	-,143	,340	,260
	Superior	,666	1	,703	,278	,666	,624
Plantio_Direto							
Correlação de Pearson		,625	,595	1	-,024	,625	,183
Sig. (bilateral)		,000	,000		,808	,000	,067
Soma dos quadrados e produtos cruzados		1,892	2,094	3,879	-,100	1,892	,755
Covariância		,019	,021	,039	-,001	,019	,008
N		101	101	101	101	101	101
Bootstrap[c]	Viés	,000	-,008	0	-,003	,000	,001
	Erro	,077	,067	0	,097	,077	,084
	Intervalo de Confiança 95%						
	Inferior	,459	,434	1	-,221	,459	,017
	Superior	,760	,703	1	,156	,760	,341
Calagem							
Correlação de Pearson		,014	,065	-,024	1	,014	-,252
Sig. (bilateral)		,889	,518	,808		,889	,011
Soma dos quadrados e produtos cruzados		,045	,241	-,100	4,302	,045	-1,094
Covariância		,000	,002	-,001	,043	,000	-,011
N		101	101	101	101	101	101
Bootstrap[c]	Viés	-,002	-,002	-,003	0	-,002	,000
	Erro	,110	,109	,097	0	,110	,088
	Intervalo de Confiança 95%						
	Inferior	-,190	-,143	-,221	1	,190	-,423
	Superior	,217	,278	,156	1	,217	-,073

Colheita Mecanizada							
Correlação de Pearson		1,000	,519	,625	,014	1	,210
Sig. (bilateral)		,000	,000	,000	,889		,035
Soma dos quadrados e produtos cruzados		2,361	1,424	1,892	,045	2,361	,676
Covariância		,024	,014	,019	,000	,024	,007
N		101	101	101	101	101	101
Bootstrap[c]	Viés	,000	-,003	,000	-,002	0	,004
	Erro	,000	,082	,077	,110	0	,093
	Intervalo de Confiança 95%						
	Inferior	1,000	,340	,459	-,190	1	,031
	Superior	1,000	,666	,760	,217	1	,393
Maturadores_Químicos							
Correlação de Pearson		,210	,440	,183	-,252	,210	1
Sig. (bilateral)		,035	,000	,067	,011	,035	
Soma dos quadrados e produtos cruzados		,676	1,643	,755	-1,094	,676	4,374
Covariância		,007	,016	,008	-,011	,007	,044
N		101	101	101	101	101	101
Bootstrap[c]	Viés	,004	,007	,001	,000	,004	0
	Erro	,093	,094	,084	,088	,093	0
	Intervalo de Confiança 95%						
	Inferior	,031	,260	,017	-,423	,031	1
	Superior	,393	,624	,341	-,073	,393	1

Fonte: Elaborado pelo autor (software Gams).

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita, mas inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis.

O sinal na covariância indica o tipo de relação que as duas variáveis têm. Um sinal positivo indica que elas movem juntas e um negativo que elas movem em direções opostas. Enquanto a covariância cresce com o poder d o relacionamento,

ainda é relativamente difícil fazer julgamentos sobre o poder do relacionamento entre as duas variáveis observando a covariância, pois ela não é padronizada.

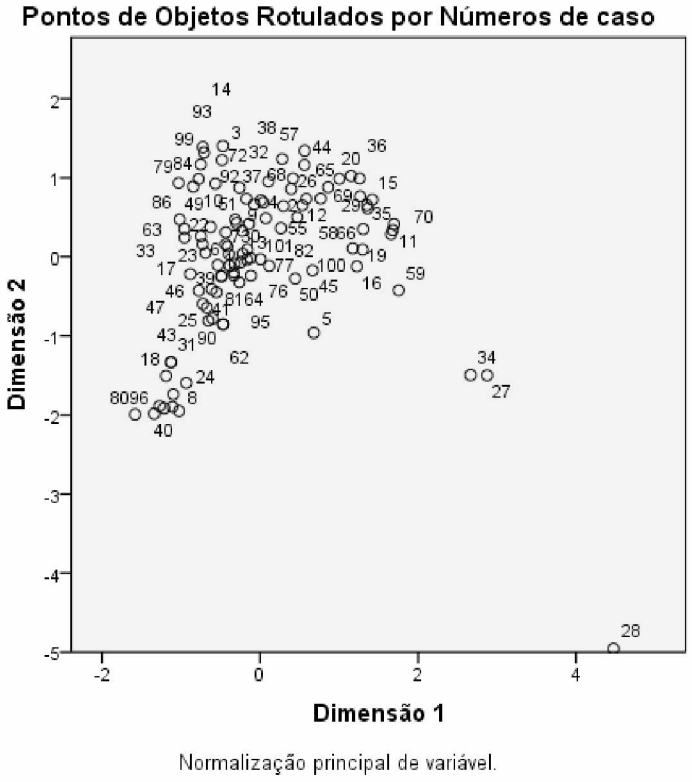
Diante desse contexto, as variáveis com relação mais forte para a obtenção do máximo rendimento do teor alcóolico são:

- Chuva/Irrigação com Colheita Mecanizada e Plantio Direto;
- Adubação/NPK com Calagem, Colheita Mecanizada e Maturadores Químicos;
- Plantio Direto com Chuva/Irrigação, Colheita Mecanizada e Adubação/NPK;
- Calagm com Chuva/Irrigação e Plantio Direto;
- Colheita Mecanizada com Chuva/Irrigação, Plantio Direto e Adubação/NPK;
- Maturadores Químicos com Adubação/NPK.

E, as variáveis com relação mais fraca são:

- Chuva/Irrigação com Calagem e Maturadores Químicos;
- Adubação/NPK com Calagem;
- Plantio Direto com Calagem e Maturadores Químicos;
- Colheita Mecanizada com Maturadores Químicos.

Figura 22: Biplot do spss



Fonte: Elaborado pelo autor (software IBM SPSS Statistics).

O Biplot da Figura 22 apresenta a normalização entre duas dimensões, sendo todas aglomeradas entre -2 e 2, com alta concentração entre 0 e 1 nas duas dimensões, comprovando assim a força da correlação encontrada entre as variáveis.

4.5 SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Para solucionar o Modelo Matemático descrito anteriormente no GAMS, foi necessário utilizar os símbolos e funções logo após a definição dos indices, parametrização e definição das variáveis de decisão e restrições ao modelo.
O símbolo ***Model***foi utilizado para determinar o modelo e seu nome:

- $Model\ rendimento\ /all/;$

O símbolo ***solve*** foi utilizado para determinar a utilização de um Solve específico dentro de uma gama de opções como LP, NLP, MIP. No caso, para a solução desse modelo, foi utilizado a opção ***MIP*** (*MixedInteger Linear Programming*), pois não é só uma programação linear com variáveis continuas apenas para utilizar o ***LP*** (*Linear Programming)*, e, sim um mix de variáveis em conjuntos de índices sendo binários, integrais e contínuas, onde há uma relação na Função Objetivo das Variáveis de decisão, com cada indexador dos índices que formam uma matriz, e não apenas relacionado a um específico, o que utilizando o LP teria um retorno de erro, ou deveria ser montado uma matriz para evitar o erro o que tornaria o modelo muito mais complexo de montar e resolver para obter a solução desejada.

- $Solve\ rendimento\ using\ MIP\ maximizing\ Z;$

Assim, o modelo foi desenvolvido no software GAMS e seu resultado está apresentado a seguir:

- O valor máximo de Z obtido foi de 93 litros de etanol por tonelada de cana processada, e o teor alcoolico foi de 0,650 %/ºbx com os seguintes resultados dos índices:
  - Vari = 1 ou Vari = 0, nesse caso o resultado foi o mesmo utilizando qualquer uma das duas variedades;
  - Plant = 0, nesse caso o resultado melhor obtido foi para o sistema de plantio direto;
  - Solo = 1 ou Solo = 0, nesse caso o resultado foi o mesmo utilizando qualquer um tipo de solo, da região de Ribeirão Preto/SP ou do Triângulo Mineiro;
  - Adub = 1, o resultado melhor foi para a utilização de correções do solo com adubação (NPK) seguindo os parâmetros de cana-soca definidos no capítulo 5;

- Calc = 0, o resultado melhor foi para a utilização de calcário 85% e não 100% para os dois tipos de solo;
- Colh = 0, o resultado melhor foi para sistema de colheita mecanizada e não manual;
- pH = 5,5;
- Pol = 15,5 %;
- Bmf = 16,5 ºbx;
- Art = 130 toneladas / hora;
- Purz = 86%;
- Fib = 145 toneladas / hora;

Para a determinação final real desses valores, o GAMS faz a correlação dos binários comparando cada resultado com os valores alterados e faz o comparativo dos valores contínuos já convertidos para uma tonelada de cana processada de acordo com as restrições apresentadas. Os resultados finais já foram convertidos novamente para o processo horário no caso de Art e Fib, % no caso do Pol e Purz e ºbx no caso no Bmf, o ph como é adimensional não foi necessária conversão para o programa e depois para o relatório do trabalho.

4.6 DISCUSSÃO

Durante um período de 2 anos e meio, o trabalho consistiu em visitas *in loco* nas usinas de cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro e noroeste de São Paulo, com o objetivo de entender todo o processo de produção do etanol, passando por etapas desde o preparo do solo e escolha da variedade a ser plantada, até a colheita e o processamento na Usina.

Houve uma necessidade de entender consistentemente todas essas etapas para a correta e detalhada caracterização do processo de obtenção de etanol da cana-de-açúcar.

E, para a formulação do modelo, houve a necessidade também da coleta de dados do processo e das análises laboratoriais desde o plantio até o esmagamento nas moendas das Usinas.

Pode-se realmente montar o modelo matemático, onde o início foi com a determinação e validação das variáveis, identificando se essas tinham

correspondência estatística linear ou não linear com o rendimento de etanol e o teor alcóolico do caldo do mosto obtidos no processamento da cana nas usinas.

Para tal foi elaborada uma planilha com todas as variáveis (apêndice 1) e depois foi reformulada e reduzida em uma Tabela única com as relações encontradas para um período de 101 semanas de análise laboratorial. Depois também foram elaboradas tabelas as quais identificaram a média aritmética simples da relação das 101 semanas para as 3 usinas objetos do estudo.

Além da linearidade foi feita uma análise estatística multivariada para determinar o nível de correlação entre pares de variáveis e entre todas ao mesmo tempo para identificar aquelas que possuem alta atratividade e correlação e podem contribuir para um melhor resultado do modelo matemático.

Após a identificação da linearidade das variáveis e da análise estatística multivariada pode-se determinar que o modelo matemático seguiria a linha da Programação Linear da Pesquisa Operacional (LP) a ser utilizada no GAMS, porém, como as variáveis não eram somente lineares, mas também discretas (binárias, contínuas e inteiras), foi utilizado no GAMS o MIP para solucionar o problema.

A base de cálculo utilizada no modelo foi de toneladas de cana processadas, representando assim uma batelada. Todas as variáveis foram inseridas no software convertidas para a base de cálculo, a não ser os valores adimensionais como os binários e o pH, e, depois foram reconvertidas para os resultados serem apresentados no relatório e comparados com os dados obtidos nas usinas.

O valor de 93 litros de etanol por tonelada de cana processada é ideal para usina que produz somente etanol e não produz açúcar, no qual ao comparar com a planilha do Apêndice 1 pode-se validar o resultado do software, pois a média foi de 89 litros no relatório, valor muito próximo considerando o modelo.

O modelo matemático somado ao uso de bioprodutos pode elevar ainda mais o rendimento de etanol obtido por tonelada de cana processada na Primeira Geração, evitando assim os custos elevados para se obter o etanol de segunda geração nas usinas de cana-de-açúcar, haja visto que são poucas usinas com capacidade para tal e o fator *commodite* do açúcar faz com que fique ainda mais inviável a obtenção pela segunda geração.

5 CONCLUSÕES

Diante do estudo realizado, da coleta prática de dados nas usinas e no acompanhamento do processo produtivo para obtenção de etanol de cana-de-açúcar foi possível observar que existe uma necessidade de otimização e de elevação do rendimento do etanol de primeira geração.

O objetivo deste trabalho foi propor um modelo matemático com utilização de um software de simulação (GAMS) para determinação da combinação de variáveis de decisão e restrição tratadas e correlacionadas estatisticamente com o software IBM SPSS Statistics. Buscou-se também estudar a relação de desempenho entre quantidade em tonelada de cana-de-açúcar processada, teor alcóolico obtido pelo mosto no processo da usina e litros de etanol por cana processada.

No estudo identificou-se também as variáveis do processo de obtenção do etanol, coletando os dados nos produtores rurais e nas usinas, definindo o tipo do modelo matemático a ser utilizado, as características de suas variáveis, as restrições da função objetivo, a função objetivo e consequentemente o modelo matemático, além de demonstrar a formulação desse modelo no software GAMS.

O resultado do modelo otimizou uma relação entre variáveis do processo produtivo da cana-de-açúcar obtendo 93 litros de etanol por tonelada de cana processada nas usinas em média.

Recomendações de estudo complementar a esse trabalho, pode-se utilizar o mesmo modelo matemático para avaliar a relação de custos entre produção de etanol e açúcar nas usinas, determinar a maximização de resultados financeiros e também utilizar ferramentas estatísticas para otimizar os processos da usina, considerando os processos produtivos, de planejamento estratégico, controle de processo, qualidade e manutenção.

REFERÊNCIAS

ABEL, D. J. *et al.*. A routingandschedulingproblem for rail system: A case study. The JournaloftheOperationalResearchSociety, v. 32, n. 9, p. 767-774, set. 1981.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (Brasil) (ANP). Anuário estatístico da indústria brasileira do petróleo e gás natural. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <www.anp.gov.br/conheca/apresenta.asp?id=1>. Acesso em: 31 maio 2015.

AGRIMANAGERS. Números atuais da colheita mecanizada de cana-de-açúcar no estado de SP. Disponível em: <http://www.agrimanagers.wordpress.com/category/energia-renovavel>. Acesso em: 24 jul. 2015.

Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <"http://www.anp.gov.br/." .>. Acesso em: 16 jun. 2013.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2010.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. Pesquisa operacional paracursos de engenharia. Editora Campus, 2007.

Biodieselbr. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/energia/demanda-energia.htm>. Acesso em: 16 jun. 2013.

BARATA, M. Q. F. Otimização econômica do corte e reforma de canaviais. 1992. 173 f. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

BARBIERI, V. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (Saccharum spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa. 1993. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ, Univeridade de São Paulo, Piracicaba.

BARBOSA *et al.*. Variedades melhoradas de cana-de-açúcar para Minas Gerais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 20-24, jul./ago. 2007.

BELTRÃO, N. E. M.; VALE, L.; SILVA, O. R. F. Grãos oleaginosos. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da. (Ed.). Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. cap. 4, p. 753-766.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento. Estudos de Demanda. Consulta geral a homepage oficial. Disponível em: www.bndes.gov.br/arqs/corredorbioceanico/Produto % 204A%20Parte%20IB.pdf> Acesso em: 19 dez. 2013.

BRASKEM. Cana-de-açúcar no Brasil. Disponível em: <http://www.braskem.com.br/site. aspx/Cana-de-Acucar>. Acesso em: 02 jun. 2015.

CAIXETA-FILHO, J. V. Pesquisa Operacional. São Paulo: Atlas, 2001.

CAMARGO, C. A., & USHIMA, A. H. Conservaçao de energia na indústria do acúcar e do álcool: Manual de recomendaçoes. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

CARMO, V. B. Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar - fase industrial. Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas - FAPESP. Campinas: Unicamp, 2008.

CAVALETT, O., CHAGAS, M. F., SUGAWARA, E. T., SEABRA, J. E., CARDOSO, T. F., & FRANCO, H. J. Inventário de ciclo de vida da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Anais (pp. 280-286). Maringá: III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, 2012.

CGEE, C. d., & BNDES, B. N. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

CML. Anoperationalguidetothe ISO-standards - Part 3: Scientific Background (Final Report). Leiden: Leiden University, 2001.

COCK, J. H.; LUNA, C. A.; PALMA, A. The trade-off between total harvestableproductionandconcentrationoftheeconomicallyusefulyieldcomponent: canetonnageand sugar content. Field CropsResearch, v. 67, n. 3, p. 257-262, ago. 2000.

CONSECANA. Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. Manual de Instruções. 5ª edição. CONSECANA-SP, Piracicaba-SP, 2006.

COLIN, E. C.; CIPPARRONE, F. A. M.; SHIMIZU, T. Otimização do custo de transporte na distribuição-armazenagem de açúcar. Produção, v. 9, n. 1, p. 23-30, maio 1999.

CORRAR, Luiz J.; THEÓFILO, Carlos Renato. Pesquisa Operacional para a Decisão em Contabilidade e Administração. São Paulo. Editora Atlas. 2004.

CORTEZ, L. A., LORA, E. E., & GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Unicamp: Editora Unicamp, 2008.

CTC, C. d. I Seminario de Tecnologia Industrial. Piracicaba: Anais, 1990.

EHRLICH, P. J.Pesquisa Operacional: curso introdutório. São Paulo. Editora Atlas. 1985.

EMBRAPA. Agência Embrapa de Informação tecnológica. Cana-de-açúcar. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore.html>. Acesso em: 25 out. 2015.

ENGEL, A. B. Introdução à Biomatemáticadeterminísta dos sistemas ecológicos. Campinas: CNMAC/Editora da UNICAMP, 1984. 173p. (CNMAC. Minicurso, 6).

FALZETTA, D. Álcool, energia do futuro. Bayer Report, ed. 2005/2006, p. 15-19, Nov, 2006.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. Quimica Nova, São Pualo, v. 32, n. 3, 582-587, 2009.

GREENPRO. Bioenergia: manual sobre tecnologias, projecto e instalação. [S.l.], 2004.

GRISOTTO, M. E. Otimização do transporte de cana-de-açúcar por caminhões. 1995. 121f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

HIGGINS, A. J. Schedulingofroadvehicles in sugar transport: A case study at anAustralian sugar mill. EuropeanJournalofOperationalResearch, v. 170, n. 3, p. 987-1000, maio 2006.

HIGGINS, A. J. *et al.*. A framework for integrating a complexharvestingandtransport system for sugar production. Agricultural Systems, v. 82, n. 2, p. 99-115, nov. 2004.

IANNONI, A. P.; MORABITO. R. A discretesimulationanalysisof a logisticssupply system. TransportationResearchPart E: LogisticsandTransportationReview, v. 42, n. 3, p. 191-210, maio 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Outlook 2006. Paris, 2006. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. SustainableProductionofSecond-GenerationBiofuelsPotentialand perspectives in major economiesanddeveloping countries. Paris, 2010. Informationpaper.

JONES, J. W.; MISHOE, W. K; BOOTE, L. Introductiontosimulationandmodeling. In: The Seminar/Workshop on Computer CropSimulationand Data Base management for AgrotecnologyTransfer, coord. Food&FertilizerThecnology Center, nationalChungHsingUniversityand IBSNAT/USAID. Taaiwan, 1987. 21 p. (FFTC. Technical Bulletin, 100).

KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIZAKI, H. Optimizingtransportationandstorageof final products in the sugar andethanolindustry. InternationalTransactions in OperationalResearch, v. 13, n. 5, p. 425-439, set. 2006.

LEAL, M. R. Evolução Tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In C. L. Cortez, Bioetanol de cana-de-açúcar: P & D para produtividade e sustentabilidade (pp. 561-575). São Paulo: Blucher, 2010.

LOPES, M. B. Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar. Piracicaba, 1995. 143 f.. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba,

MACEDO, I. C.; SEABRA, J.E.A; SILVA, J.E.A.R. Greenhouse gases emissions in theproductionand use of etanol fromsugarcane in Brazil. BiomassandBioenergy, v. 32, p. 582 – 595, 2008.

MARQUES, P. Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008. Piracicaba: Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), 2009.

MATHEW, J.; RAJENDRAN, C. Schedulingofmaintenanceactivities in a sugar industryusingsimulation. Computers in Industry, v. 21, n. 3, p. 331-334, abr. 1993.

MILAN, E. L; FERNANDEZ, S. M.; ARAGONES, L. M. P. Sugar canetransportation in Cuba, a case study. EuropeanJournalofOperationalResearch, v. 174, n. 1, p. 374-386, out., 2006.

NOVA CANA. Produção de Açúcar no Brasil e no Mundo. Disponível em: <http://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo >. Acesso em: 06 jul. 2015.

OLIVEIRA, A. Cana-de-açúcar - principais variedades, qualidade e rendimento. Disponível em:<http://www.cpt.com.br/cursos-agroindustria/artigos/cana-de-acucar-principais-variedades-qualidade-e-rendimento>. Acesso em: 15 out. 2015.

PAYNE, J. H. Operações unitárias na produção de cana-de-açúcar. São Paulo: Nobel / STAB, 1989.

PELLEGRINI, L. F.Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar. álcool e eletricidade. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

PIACENTE, F. J. Inovação e Trajetórias Tecnológicas: o caso dos dois sistemas para extração de sacarose no Brasil. Tese (Doutorado). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, 2010.

RAMOS, R. P. Modelo matemático para custo e energia na produção de açúcar e álcool. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Botucatu: Unesp, 2010.

RODRIGUEZ, L. D. A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação. UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora, dissertação de mestrado, 2010.

ROMÃO JÚNIOR, R. A. Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana-de-açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2009.

SEGURA, M. L. A evoluçãoenergéticabrasileira e fontesalternativas. Disponível em :<http://carollinasalle.jusbrasil.com.br/artigos/122363205/a-evolucao-da-matriz-energetica-brasileira-o-papel-dos-biocombustiveis-e-outras-fontes-alternativas>. Acessado em 20 de março de 2016.

TAHA, H. A. PesquisaOperacional: umavisãogeral. 8ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008.

UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo) Informação UNICA. Ano 6, n. 51, janeiro/fevereiro de 2003. Disponível em: <http://www.unica.com.br/files/informacaounica/unica51.pdf>. Acesso em: 20 de abril 2015.

UNICAMP; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil. Brasília/DF. CGEE, 2009.

WHAN, B. M.; SCOTT, C. H.; JEFFERSON, T. R. Scheduling sugar caneplantandratooncropsand a fallow - a constrainedmarkovmodel. Journalofagriculturalengineeringresearch, v. 21, n. 3, p. 281-289, set. 1976.

VAN WISSEN, M. E. *et al.*.Discreteeventmodelinganddynamicoptimizationof a sugar plant. Delft: Delft Universityof Technology, 2005. Relatório técnico.

YAMADA, M. C. Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira visando à aplicação em estudos de simulação. 1999. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; MUSCAT, A. R. N.; BIAZZI, J. L. Decentralizingethanoldistribution in southeasternBrazil. Interfaces, v. 26, n. 6, p. 24-34, nov./dez. 1996.

APÊNDICE A: Tabela dos dados laboratoriais e de campo coletados nas usinas entre 2013 e 2015.

Período	B: CANA			C: MOENDA			F: MOSTO			
	26	34	35	36	38	39	52	53	55	64
	Teor Alcoólico Caldo PCTS	Cana Moída	ART	Fibra	Embebição % Fibra	Extração Total	ART	Pureza	Acidez	Teor Alcoólico
	% /Brix	Ton./Hora	Ton./Hora	Ton./Hora		%	%	%	g H_2SO_4/L	%/ Brix
Semana	0,05	950,73	157,03	133,16	341,90	95,93	17,32	55,46	1,44	0,309
1	0,092	410,230	41,970	52,54	128,92	95,24	18,03	70,82	0,53	0,002
2	0,066	585,200	71,250	83,50	139,15	95,64	11,08	62,17	0,83	0,004
3	0,092	794,710	93,400	100,31	329,57	96,41	12,91	63,75	0,77	0,010
4	0,067	933,750	114,690	113,30	317,93	96,67	16,43	58,24	1,05	0,014
5	0,080	976,690	120,990	115,67	342,19	96,78	17,90	61,81	1,12	0,013
6	0,053	991,010	128,380	119,02	278,80	97,10	17,13	63,38	1,57	0,025
7	0,068	984,970	129,330	119,90	313,53	97,22	18,16	54,73	1,91	0,009
8	0,173	907,940	123,840	115,50	339,73	95,90	18,29	58,17	3,78	0,010
9	0,109	784,590	110,030	96,27	187,84	95,77	19,58	55,40	3,75	0,017
10	0,190	974,830	135,490	121,08	265,01	96,52	17,67	60,74	2,49	0,119
11	0,087	937,420	140,210	117,01	254,43	96,04	18,71	65,94	1,66	0,016
12	0,209	1.007,240	144,760	123,25	261,57	96,81	18,80	66,47	2,75	0,079
13	0,170	995,610	144,440	122,94	250,93	96,65	18,97	65,93	3,15	0,090
14	0,080	1.022,870	151,230	126,55	243,85	96,20	18,73	66,53	3,35	0,064
15	0,055	1.181,390	290,720	243,390	224,37	96,37	18,97	65,99	2,43	0,095
16	0,068	983,820	146,380	125,080	276,17	95,92	20,63	63,89	3,31	0,610
17	0,097	949,370	144,720	123,680	290,23	96,22	19,17	63,06	2,26	0,042
18	0,048	986,660	156,540	126,260	262,25	96,77	16,43	58,81	3,28	0,139
19	0,102	902,840	146,390	117,580	251,42	95,99	19,62	61,94	3,53	0,191
20	0,112	994,390	159,820	127,340	261,78	96,13	22,01	61,85	3,10	0,174
21	0,078	965,290	157,280	125,950	265,98	96,68	18,29	60,76	4,06	0,586

22	0,06	970,18	159,77	124,58	277,36	96,56	17,68	59,55	3,41	0,082
23	0,03	891,16	151,56	120,08	291,56	96,41	18,75	59,75	3,19	0,096
24	0,048	903,400	161,110	129,300	286,93	96,38	17,96	59,91	2,64	0,057
25	0,048	848,590	151,360	123,370	352,95	96,07	17,38	53,13	2,96	0,123
26	0,059	805,890	144,580	120,560	334,43	95,98	18,22	55,60	3,09	0,092
27	0,29	1.150,20	253,25	216,76	337,59	95,85	16,68	39,86	1,60	0,032
28	0,092	942,500	149,620	127,900	278,08	96,41	17,83	60,82	2,41	0,110
29	0,033	924,250	155,520	131,850	292,53	95,50	16,19	58,33	2,05	0,025
30	0,051	950,730	157,030	133,160	341,90	95,93	17,32	55,46	1,44	0,309
31	0,092	410,230	41,970	52,54	128,92	95,24	18,03	70,82	0,53	0,002
32	0,066	585,200	71,250	83,50	139,15	95,64	11,08	62,17	0,83	0,004
33	0,092	794,710	93,400	100,31	329,57	96,41	12,91	63,75	0,77	0,010
34	0,067	933,750	114,690	113,30	317,93	96,67	16,43	58,24	1,05	0,014
35	0,080	976,690	120,990	115,67	342,19	96,78	17,90	61,81	1,12	0,013
36	0,053	991,010	128,380	119,02	278,80	97,10	17,13	63,38	1,57	0,025
37	0,068	984,970	129,330	119,90	313,53	97,22	18,16	54,73	1,91	0,009
	0,089	942,250	150,010	128,180	280,75	96,37	17,75	60,58	2,36	0,113
38	0,173	907,940	123,840	115,50	339,73	95,90	18,29	58,17	3,78	0,010
39	0,109	784,590	110,030	96,27	187,84	95,77	19,58	55,40	3,75	0,017
40	0,190	974,830	135,490	121,08	265,01	96,52	17,67	60,74	2,49	0,119
41	0,087	937,420	140,210	117,01	254,43	96,04	18,71	65,94	1,66	0,016
42	0,209	1.007,240	144,760	123,25	261,57	96,81	18,80	66,47	2,75	0,079
43	0,170	995,610	144,440	122,94	250,93	96,65	18,97	65,93	3,15	0,090
44	0,080	1.022,870	151,230	126,55	243,85	96,20	18,73	66,53	3,35	0,064
45	0,055	1.181,390	290,720	243,390	224,37	96,37	18,97	65,99	2,43	0,095
46	0,068	983,820	146,380	125,080	276,17	95,92	20,63	63,89	3,31	0,610
47	0,097	949,370	144,720	123,680	290,23	96,22	19,17	63,06	2,26	0,042
48	0,048	986,660	156,540	126,260	262,25	96,77	16,43	58,81	3,28	0,139
49	0,102	902,840	146,390	117,580	251,42	95,99	19,62	61,94	3,53	0,191
50	0,112	994,390	159,820	127,340	261,78	96,13	22,01	61,85	3,10	0,174

51	0,078	965,290	157,280	125,950	265,98	96,68	18,29	60,76	4,06	0,586
52	0,06	970,18	159,77	124,58	277,36	96,56	17,68	59,55	3,41	0,082
53	0,03	891,16	151,56	120,08	291,56	96,41	18,75	59,75	3,19	0,096
54	0,048	903,400	161,110	129,300	286,93	96,38	17,96	59,91	2,64	0,057
55	0,048	848,590	151,360	123,370	352,95	96,07	17,38	53,13	2,96	0,123
56	0,059	805,890	144,580	120,560	334,43	95,98	18,22	55,60	3,09	0,092
57	0,29	1.150,20	253,25	216,76	337,59	95,85	16,68	39,86	1,60	0,032
58	0,092	942,500	149,620	127,900	278,08	96,41	17,83	60,82	2,41	0,110
59	0,033	924,250	155,520	131,850	292,53	95,50	16,19	58,33	2,05	0,025
60	0,051	950,730	157,030	133,160	341,90	95,93	17,32	55,46	1,44	0,309
61	0,092	410,230	41,970	52,54	128,92	95,24	18,03	70,82	0,53	0,002
62	0,066	585,200	71,250	83,50	139,15	95,64	11,08	62,17	0,83	0,004
63	0,092	794,710	93,400	100,31	329,57	96,41	12,91	63,75	0,77	0,010
64	0,067	933,750	114,690	113,30	317,93	96,67	16,43	58,24	1,05	0,014
65	0,080	976,690	120,990	115,67	342,19	96,78	17,90	61,81	1,12	0,013
66	0,053	991,010	128,380	119,02	278,80	97,10	17,13	63,38	1,57	0,025
67	0,068	984,970	129,330	119,90	313,53	97,22	18,16	54,73	1,91	0,009
68	0,173	907,940	123,840	115,50	339,73	95,90	18,29	58,17	3,78	0,010
69	0,109	784,590	110,030	96,27	187,84	95,77	19,58	55,40	3,75	0,017
70	0,190	974,830	135,490	121,08	265,01	96,52	17,67	60,74	2,49	0,119
71	0,087	937,420	140,210	117,01	254,43	96,04	18,71	65,94	1,66	0,016
72	0,209	1.007,240	144,760	123,25	261,57	96,81	18,80	66,47	2,75	0,079
73	0,170	995,610	144,440	122,94	250,93	96,65	18,97	65,93	3,15	0,090
74	0,080	1.022,870	151,230	126,55	243,85	96,20	18,73	66,53	3,35	0,064
75	0,055	1.181,390	290,720	243,390	224,37	96,37	18,97	65,99	2,43	0,095
76	0,068	983,820	146,380	125,080	276,17	95,92	20,63	63,89	3,31	0,610
77	0,097	949,370	144,720	123,680	290,23	96,22	19,17	63,06	2,26	0,042
78	0,048	986,660	156,540	126,260	262,25	96,77	16,43	58,81	3,28	0,139
79	0,102	902,840	146,390	117,580	251,42	95,99	19,62	61,94	3,53	0,191
	0,089	942,250	150,010	128,180	280,75	96,37	17,75	60,58	2,36	0,113

80	0,112	994,390	159,820	127,340	261,78	96,13	22,01	61,85	3,10	0,174
81	0,078	965,290	157,280	125,950	265,98	96,68	18,29	60,76	4,06	0,586
82	0,06	970,18	159,77	124,58	277,36	96,56	17,68	59,55	3,41	0,082
83	0,03	891,16	151,56	120,08	291,56	96,41	18,75	59,75	3,19	0,096
84	0,048	903,400	161,110	129,300	286,93	96,38	17,96	59,91	2,64	0,057
85	0,048	848,590	151,360	123,370	352,95	96,07	17,38	53,13	2,96	0,123
86	0,059	805,890	144,580	120,560	334,43	95,98	18,22	55,60	3,09	0,092
87	0,29	1.150,20	253,25	216,76	337,59	95,85	16,68	39,86	1,60	0,032
88	0,092	942,500	149,620	127,900	278,08	96,41	17,83	60,82	2,41	0,110
89	0,033	924,250	155,520	131,850	292,53	95,50	16,19	58,33	2,05	0,025
90	0,051	950,730	157,030	133,160	341,90	95,93	17,32	55,46	1,44	0,309
91	0,033	924,250	155,520	131,850	292,53	95,50	16,19	58,33	2,05	0,025
92	0,051	950,730	157,030	133,160	341,90	95,93	17,32	55,46	1,44	0,309
93	0,092	410,230	41,970	52,54	128,92	95,24	18,03	70,82	0,53	0,002
94	0,066	585,200	71,250	83,50	139,15	95,64	11,08	62,17	0,83	0,004
95	0,092	794,710	93,400	100,31	329,57	96,41	12,91	63,75	0,77	0,010
96	0,067	933,750	114,690	113,30	317,93	96,67	16,43	58,24	1,05	0,014
97	0,051	950,730	157,030	133,160	341,90	95,93	17,32	55,46	1,44	0,309
98	0,092	410,230	41,970	52,54	128,92	95,24	18,03	70,82	0,53	0,002
99	0,066	585,200	71,250	83,50	139,15	95,64	11,08	62,17	0,83	0,004
100	0,092	794,710	93,400	100,31	329,57	96,41	12,91	63,75	0,77	0,010
	0,089	942,250	150,010	128,180	280,75	96,37	17,75	60,58	2,36	0,113

APÊNDICE B: Saídas do Software IBM SPSS Statistics

Bootstrap

Observações

Saída criada		31-JAN-2017 09:16:38
Comentários		
Entrada	Conjunto de dados ativo	ConjuntodeDados1
	Filtro	<none>
	Ponderação	<none>
	Arquivo Dividido	<none>
Sintaxe		BOOTSTRAP /SAMPLING METHOD=SIMPLE /VARIABLES INPUT=Chuva_Irrigação Adubação_NPK Plantio_Direto Calagem Colheita_Mecanizada Maturadores_Químicos /CRITERIA CILEVEL=95 CITYPE=PERCENTILE NSAMPLES=1000 /MISSING USERMISSING=EXCLUDE.
Recursos	Tempo do processador	00:00:00,02
	Tempo decorrido	00:00:00,02

Especificações de bootstrap

Método de amostragem	Simples
Número de amostras	1000
Nível do intervalo de confiança	95,0%
Tipo de intervalo de confiança	Percentil

Resumo de processamento de casos

Casos ativos válidos	101
Casos ativos com valores omissos	0
Casos complementares	0
Total	101
Casos utilizados na análise	101

Histórico de iteração

Número de iteração	Variância contabilizada para		Perda
	Total	Aumentar	
36[a]	3,281863	,000010	2,718137

a. O processo de iteração foi interrompido porque o valor de teste de convergência foi atingido.

Sumarização do modelo

Dimensão	Alfa de Cronbach	Variância contabilizada para		
		Total (autovalor)	Inércia	% de variância
1	,857	3,497	,583	58,279
2	,809	3,067	,511	51,117
Total		6,564	1,094	
Média	,834[a]	3,282	,547	54,698

a. A Média de Alfa de Cronbach tem como base o autovalor médio.

Variáveis transformadas de correlações

Dimensão: 1

	Chuva_Irrigação	Adubação_NPK	Plantio_Direto	Calagem			
Chuva_Irrigação	1,000	,657	,608	,496			
Adubação_NPK	,657	1,000	,448	,586			
Plantio_Direto	,608	,448	1,000	,215			
Calagem	,496	,586	,215	1,000			
Colheita_Mecanizada	1,000	,657	,608	,496			
Maturadores_Químicos	,277	,428	,197	,039			
Semanas[a]	,934	,835	,692	,633			
Dimensão	1	2	3	4			
Autovalor[b]	3,497	,978	,823	,436			

Variáveis transformadas de correlações

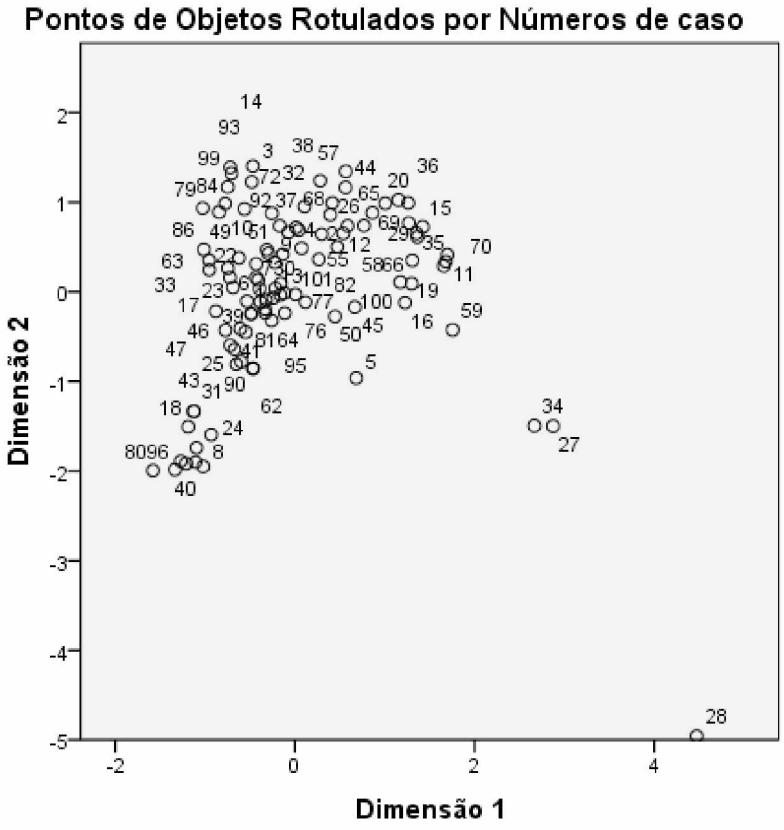
Dimensão: 1

	Colheita_Mecanizada	Maturadores_Químicos	Semanas
Chuva_Irrigação	1,000	,277	,934
Adubação_NPK	,657	,428	,835

Plantio_Direto	,608	,197	,692
Calagem	,496	,039	,633
Colheita_Mecanizada	1,000	,277	,934
Maturadores_Químicos	,277	1,000	,415
Semanas[a]	,934	,415	1,000
Dimensão	5	6	
Autovalor[b]	,266	,000	

a. Variável complementar.

b. Autovalores da matriz de correlações com exclusão de variáveis complementares.



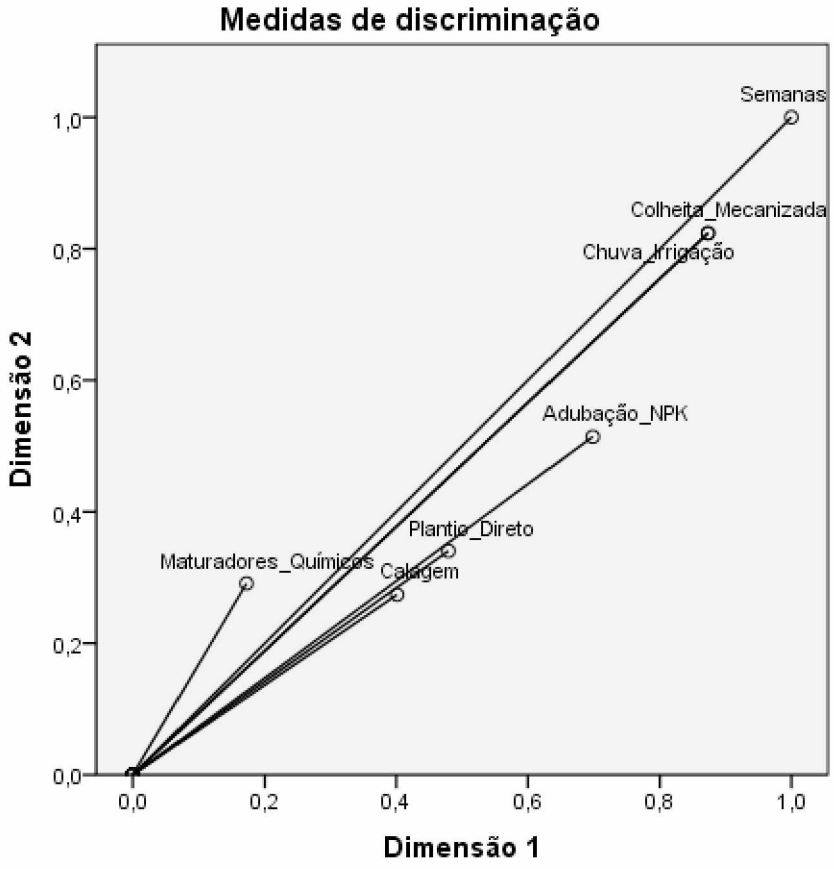
Normalização principal de variável.

Medidas de discriminação

Medidas de discriminação

	Dimensão		
	1	2	Média
Chuva_Irrigação	,873	,824	,848
Adubação_NPK	,698	,514	,606
Plantio_Direto	,479	,340	,410
Calagem	,401	,274	,338
Colheita_Mecanizada	,873	,824	,848
Maturadores_Químicos	,172	,291	,232
Semanas[a]	1,000	1,000	1,000
Total ativo	3,497	3,067	3,282
% de variância	58,279	51,117	54,698

a. Variável complementar.



Normalização principal de variável.