

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SAMUEL CÉSAR SILVA DOS SANTOS

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO
ETANOL EM UMA EMPRESA NA REGIÃO DE OURINHOS/SP**

MARÍLIA
2014

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SAMUEL CÉSAR SILVA DOS SANTOS

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO
ETANOL EM UMA EMPRESA NA REGIÃO DE OURINHOS/SP**

Trabalho de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador:
Prof. Ms. Ricardo José Sabatine

MARÍLIA
2014

Santos, Samuel César Silva dos

Estudo de otimização para o processo de produção do etanol em uma empresa na região de Ourinhos/SP / Samuel César Silva dos Santos; orientador: Ricardo José Sabatine. Marília, SP: [s.n.], 2014.

66 f.

Trabalho de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Curso de Engenharia de Produção, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília –UNIVEM, Marília, 2014.

1. Otimização de Produção 2. Etanol 3. Modelagem Matemática

CDD: 658.4034



FUNDAÇÃO DE ENSINO "EURÍPIDES SOARES DA ROCHA"
Mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília - UNIVEM

Curso de Engenharia de Produção.

Samuel César Silva dos Santos - 46609-3

TÍTULO "Estudo de otimização para o processo de produção do etanol em uma empresa na região de Ourinhos/SP "

Banca examinadora do Trabalho de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia de Produção da UNIVEM, F.E.E.S.R, para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Nota: 10

ORIENTADOR: Ricardo José Sabatine
Ricardo José Sabatine

1º EXAMINADOR: Jose Michel Monassa
Jose Michel Monassa

2º EXAMINADOR: Geraldo Cesar Meneghelo
Geraldo Cesar Meneghelo

Marília, 11 de dezembro de 2014.

À Deus pela realização de um sonho;

À minha família;

Aos amigos e professores pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, sempre presente na minha vida em todos os aspectos. E que ao final de todas as etapas, concedeu-me a vitória.

À minha mãe, que mesmo nos mais singelos atos, sempre representou a forte estrutura da minha vida.

Aos colaboradores da Usina São Luiz S/A, em especial ao diretor Dr. Kiko Quagliato, que ajudou-me em um momento muito importante, durante minha formação acadêmica.

Ao Supervisor de Produção, o tecnólogo Marco Jorge Zimak, especialista que me acompanhou durante esses dias, sempre atencioso, profissional e generoso.

Aos meus amigos, funcionários e professores do UNIVEM, em especial ao professor e orientador Ms. Ricardo José Sabatine, que se tornou além de tudo, um grande amigo.

Agradeço as manifestações de carinho e apreço, recebidas de todos os colegas da Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”.

Bem-aventurado o homem que acha a sabedoria, e o homem que adquire conhecimento;

Porque melhor é a sua mercadoria do que a mercadoria de prata, e a sua renda do que o ouro mais fino.

Mais preciosa é do que os rubis, e tudo o que podes desejar não se pode comparar a ela.

Aumento de dias há na sua mão direita; na sua esquerda riquezas e honra.

Provérbios, 3, vs. 13 à 26

SANTOS, Samuel César Silva dos. **Estudo de otimização para o processo de produção do etanol em uma empresa na região de Ourinhos/SP**. 2014. 66 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2014.

RESUMO

O setor sucroenergético no Brasil, possui grande e vital importância econômica e social. Com um vasto território e condições climáticas favoráveis para o plantio da cana-de-açúcar, principal matéria-prima utilizada na produção do etanol no país; o Brasil ainda conta com uma característica muito importante e que o diferencia dos outros países produtores, uma atividade industrial interligada à atividade agrícola. Na busca por combustíveis renováveis, o etanol surge como uma alternativa muito interessante, contudo, ainda faltam tecnologias e métodos de análise, para produzi-lo com total excelência no país. Proveniente da Pesquisa Operacional, a modelagem, pode ser mensurada como uma importante ferramenta no setor sucroenergético, facilitando cálculos, análises e auxiliando a tomada de decisões. O objetivo deste trabalho, além de um estudo amplo da fabricação do etanol da cana-de-açúcar, foi o de investigar, propor, simular, analisar e validar um modelo matemático, que auxiliado por técnicas compreendidas pela Pesquisa Operacional, poderá proporcionar uma colaboração efetiva no ambiente produtivo da empresa estudada.

Palavras-chave: Otimização de Produção. Etanol. Modelagem Matemática.

SANTOS, Samuel César Silva dos. **Estudo de otimização para o processo de produção do etanol em uma empresa na região de Ourinhos/SP**. 2014. 66 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2014.

ABSTRACT

The sugarcane industry in Brazil has a large and vital social and economic importance. With a vast territory and favorable climatic conditions for the cultivation of sugar cane, the main raw material used to produce ethanol in the country; Brazil still has a very important feature which distinguishes it from other producing countries, an interconnected to agriculture industrial activity. In the search for renewable fuels, ethanol emerges as a very attractive alternative, however, still lack technologies and analysis methods, to produce it with full excellence in the country. From the Operations Research modeling, can be measured as an important tool in the sugarcane industry, facilitating calculations, analysis and aiding decision making. This work, in addition to an extensive study of the manufacture of ethanol from sugar cane, was to investigate, propose, simulate, analyze and validate a mathematical model that aided techniques understood by Operational Research, may provide a collaborative effective in the production environment of the analyzed company.

Keywords: Production Optimization. Ethanol. Mathematical Modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Setor de moendas	20
Figura 2 – Sistema de facas, picadores e desfibrador	21
Figura 3 – Estação de tratamento do caldo.....	22
Figura 4 – Processo de clarificação do caldo	23
Figura 5 – Setor de fermentação.....	24
Figura 6 – Setor de destilação I	25
Figura 7 – Setor de destilação II.....	26
Figura 8 – Modelo tradicional de pesquisa operacional	28
Figura 9 – A modelagem	29
Figura 10 – Níveis de PCP	33
Figura 11 – Fluxograma de produção.....	34
Figura 12 – Função objetivo.....	36
Figura 13 – Restrições	37
Figura 14 – Superfície de resposta da produção.....	38
Figura 15 – Superfície de resposta da produtividade	39
Figura 16 – Etapas da pesquisa.....	40
Figura 17 – Destilaria da empresa	42
Figura 18 – Copersucar	43
Figura 19 – Ação de conscientização	44
Figura 20 – Definição do ponto de processo	45
Figura 21 – Ponto de mistura do mosto.....	46
Figura 22 – Controle de vazões	47
Figura 23 – Indicador não calibrado.....	49
Figura 24 – Função objetivo - proposta.....	54
Figura 25 – Restrições de vazão máxima dos elementos do mosto	54
Figura 26 – Restrições II – densidade dos elementos.....	54
Figura 27 – Resultados	55
Figura 28 – Inclusão de valores.....	55
Figura 29 – Resultados finais	56
Figura 30 – Controle de vazões da empresa.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recomendações da utilização de planilhas.....	32
Tabela 2 – Informações de fabricação.....	53
Tabela 3 – Fluxo de massa no sistema	53

LISTA DE FÓRMULAS

Equação 1 – Restrições funcionais	30
Equação 2 – Programação linear I.....	30
Equação 3 – Programação linear II.....	30
Equação 4 – Programação linear III	30
Equação 5 – Programação linear IV	30
Equação 6 – Programação linear V	30
Equação 7 – Produto entre o brix e o volume.....	49
Equação 8 – Produto entre o brix e o volume com inclusão de incógnita.....	49
Equação 9 - Verificação de concentração dos elementos.....	50
Equação 10 – Diagrama de Cobenze.....	50
Equação 11 – Volume de massa x densidade no fluxo.....	50
Equação 12 – Vazão mássica ou fluxo de massa.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5S: Seiri (triagem), Seiton (Arrumação), Seiso (limpeza), Seiketsu (normalizar) e Shitsuke (disciplina)

°Bx: Brix

AEHC: Álcool Etílico Hidratado Carburante

AEAC: Álcool Etílico Anidro Carburante

ANP: Agência Nacional do Petróleo

ART: Açúcar Redutor Total (soma total dos açúcares (glicose e frutose))

ATR: Açúcar Total Recuperável (ART menos as perdas industriais)

BAP: Bacia do Alto Paraguai

BPF: Boas Práticas de Fabricação

BPL: Boas Práticas de Laboratório

CaSO₃: Sulfito de Cálcio

CPLEX: IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

CTC: Centro de Tecnologia Canavieira

EHC: Etanol Hidratado Carburante

GAMS: General Algebraic Modeling System

ISO: International Organization for Standardization

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MSR: Metodologia de Superfície de Resposta

NOVA CANA: Revista Nova Cana

PCP: Planejamento e Controle da Produção

PI: Programação Inteira

PIB: Produto Interno Bruto

PL: Programação Linear

PNL: Programação Não Linear

PO: Pesquisa Operacional

UDOP: União dos Produtores do Oeste Paulista

UNESP: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

UNICA: União da Indústria da Cana-de-Açúcar

UFSCAR: Universidade Federal de São Carlos

UNIFEI: Universidade Federal de Itajubá

USL: Usina São Luiz S/A

USP: Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
Objetivo.....	17
Estrutura do trabalho	17
CAPÍTULO 1 – PROCESSO DE PRODUÇÃO	18
1.1 Cana-de-açúcar	18
1.1.1 Origem.....	18
1.1.2 Composição	18
1.2 Processo indústria sucroalcooleira	19
1.2.1 Recepção da cana.....	19
1.2.2 Limpeza	20
1.2.3 Moendas	20
1.2.4 Tratamento do caldo	22
1.2.5 Clarificação do caldo	22
1.3 Processo de produção do etanol	23
1.3.1 Mosto.....	23
1.3.2 Preparo da levedura	24
1.3.3 Fermentação	24
1.3.4 Destilação	25
1.3.5 Tipos de etanol	26
1.4 Considerações finais	27
CAPÍTULO 2 – PESQUISA OPERACIONAL	28
2.1 Modelo	29
2.2 Programação linear	30
2.3 Programação inteira	31
2.4 Programação não linear.....	31
2.5 Estudos de pesquisa operacional aplicada	32
2.5.1 Estudo de caso 1 – otimização no planejamento da produção em usinas	33
2.5.2 Estudo de caso 2 – otimização na produção do etanol.....	38
2.5.3 Estudo de caso 3 – aplicação de programação por metas.....	39
2.6 Considerações Finais	41
CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO	42
3.1 A empresa.....	42
3.2 Objetivos	44
3.3 Definição do ponto do processo	45
3.4 Definição do problema.....	46
3.5 O modelo	48
3.6 Considerações finais	52
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE	53
4.1 Solução do modelo	54
4.2 Simulação	55
4.3 Validação e comparação	56

4.4 Implantação	58
4.5 Considerações finais	58
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	59
Trabalhos futuros.....	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	65
ANEXO A – FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	66

INTRODUÇÃO

Um problema reconhecido em nossos dias, a questão do combustível, foi enfrentada de frente pelo Brasil, que identificou como o mais viável dentre os combustíveis alternativos, o etanol.

Estudos apontam, que o setor sucroenergético na safra de 2013/2014, movimentou o valor de 43,4 bilhões de dólares, um aumento significativo de 44%, quando comparado à safra de 2008/2009. Em um macro ambiente, para se ter uma ideia da amplitude, essas cifras são maiores que o Produto Interno Bruto de 100 países (NOVA CANA A, 2014).

No Brasil, em 2014, existem 389 usinas de açúcar e etanol funcionando em conformidade com as exigências do Ministério da Agricultura. Dessas, 382 são autorizadas pela ANP para produzir o etanol. As unidades espalham-se por 9 estados, e variam suas capacidades entre mil litros, até três milhões e trezentos mil litros por dia (NOVA CANA B, 2014).

O Ministério da Agricultura, dispõe que o setor sucroenergético, é uma referência para outros países, explicitando a liderança mundial na produção de etanol da cana-de-açúcar, assim como a disponibilidade de terras cultiváveis (MAPA, 2014).

O potencial brasileiro na cultura é incontestável, contudo, verifica-se a existência de muitas dificuldades, em análises e definições de parâmetros gerais, no processo de produção. Em linhas gerais, a escassez de pesquisas no setor, além de dificuldades em um formato para aferição de custos específico, torna-se decorrente às unidades industriais (MARQUES, 2009).

Neste trabalho, objetivou-se conhecer o processo de fabricação do etanol, destacando a cadeia industrial, desde o início das atividades referentes a matéria prima, até a saída do produto. E como ferramenta de análise e simulação, a modelagem matemática será utilizada para auxílio da interpretação das informações nesse sistema produtivo.

As técnicas de interpretação desses resultados fundamentam-se, em Pesquisa Operacional Aplicada, englobando modelagem matemática, programação linear e não linear; alcançando assim, criação de parâmetros otimizados e pré-determinados para o processo de produção do etanol na empresa alvo do estudo.

A metodologia descritiva e exploratória apresentada viria como um importante indicador para o processo da empresa, pois a disposição proverá diretrizes de decisão, para melhor utilização dos recursos e insumos, assim como a concentração de esforços em um ponto determinado, contexto produtivo.

Objetivo

As técnicas englobadas por Pesquisa Operacional, permitem formulação, análise, simulação e representação em se tratando de problemas de otimização. Pode-se então, aplicá-la e mensurá-la em diversos contextos, seja a distribuição dos recursos limitados, insumos, minimização de custos, enfim, atender determinado objetivo.

O objetivo primário desse trabalho, é o estudo da cadeia produtiva do etanol e a investigação de modelos matemáticos para os parâmetros de produção, considerando todo seu processo, com ênfase em seu processo industrial.

E o secundário, será demonstrado de maneira relativamente simples, objetiva, porém satisfatória, informações parametrizadas e otimizadas mediante um modelo no ambiente proposto. Tudo isso, esperando auxiliar a supervisão de produção, em uma melhor tomada de decisão, no exato ponto do processo.

Estrutura do trabalho

O texto deste trabalho, estará organizado em cinco capítulos, dispostos a seguir:

O primeiro capítulo, descreve a revisão bibliográfica de todo o processo de produção da cana-de-açúcar, explicitando a fabricação do etanol.

O segundo capítulo, dispõe sobre a Pesquisa Operacional, citando também estudos de caso com a utilização de suas técnicas e métodos.

O terceiro capítulo, apresentará todo o estudo de caso realizado na Usina São Luiz S/A, um breve apanhado histórico e a proposta do modelo desenvolvido para a otimização do processo de produção do etanol.

O quarto capítulo, engloba as informações e análise da aplicabilidade da proposta na empresa.

O quinto capítulo, apresentará uma conclusão de todo o trabalho desenvolvido, e como futuros trabalhos no setor, seriam importantes e necessários nesse segmento.

CAPÍTULO 1 – PROCESSO DE PRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, desde épocas remotas, apresenta em sua transformação industrial, vários aspectos complexos e particulares.

De sua recepção, até a moagem, diversos procedimentos são realizados para o que seus produtos, sejam obtidos com total excelência.

Sua manipulação, implica em vários desdobramentos no contexto produtivo. Nesse capítulo, definem-se alguns conceitos fundamentais dispostos no trabalho, apresentando a matéria prima, o processo de produção do etanol, suas especificações assim como a metodologia de análise dos produtos.

1.1 Cana-de-açúcar

Ao longo dos tempos, o Brasil tornou-se um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo. Ramos (2010), descreve que estabelecimento da cultura, aconteceu principalmente pelas boas condições climáticas do país, assim como, sua vasta dimensão territorial.

1.1.1 Origem

Embora exista o destaque brasileiro na produção da cana-de-açúcar, sua origem é oriental:

Originária do sudeste da Ásia, onde é cultivada desde épocas remotas, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma gramínea perene. É própria de climas tropicais e subtropicais, sendo cultivada comercialmente em mais de 70 países e territórios, localizados entre os paralelos 35° N e 35° S e sua exploração concentrou-se, no início, sobre a espécie *Saccharum officinarum* (GOMES; LIMA, 1964; LUCCHESI, 2001 apud RAMOS, 2010, p. 5).

1.1.2 Composição

Segundo Beltrão *et al.* (2006) apud Santos (2010, p. 15):

A cana-de-açúcar é composta em média de 12% de fibras e 88% de caldo. Por sua vez, o caldo extraído de cana sadia é composto por água (75-82%), sólidos totais solúveis (18-25%), açúcares (15,4-24%), sacarose (14,5-23,5%), glicose (0,2-1,0%), frutose (0,0-0,5%), não açúcares (1,0-2,5%), substâncias orgânicas (0,8-1,5%) e substâncias inorgânicas (0,2-0,7%), além de vestígios de outras substâncias.

1.2 Processo indústria sucroalcooleira

Davenport (1994), dispõe que o processo, é uma conjunção de atividades estruturadas, com finalidade de um produto para determinado cliente ou mercado. Descreve ainda, o processo como forma de uma ordenação específica de atividades no tempo e no espaço, com começo e fim, inputs e outputs claramente identificados, sendo assim, uma estrutura para tomada de ações.

Em um desdobramento de processo, com foco desta vez nos procedimentos industriais, Davenport (1994), também faz colocações sobre a importância da administração das divisões de atividades, comparando o desempenho final da produção, com uma boa definição da estrutura do processo industrial, possibilitando melhorá-lo pelo seu total entendimento.

Essa estruturação, é claramente verificada no contexto produtivo do etanol, pois cada etapa de fabricação, implica em uma fração desses processos.

Desta forma, os próximos subitens do presente capítulo, apresentam-se as etapas de processo da indústria sucroalcooleira.

1.2.1 Recepção da cana

Iniciando o processo de produção, na fase da recepção da cana, existe tanto o nivelamento da quantidade a ser processada, quanto a verificação da qualidade da matéria prima.

Ramos (2010, p. 14), define a exata fase do processo:

Os caminhões de cana são pesados antes e depois do descarregamento, para assim se definir a quantidade de cana entregue. Após pesada, a cana é analisada para que se tenha definido o indicador de qualidade de cana para a produção de açúcar e álcool, ou seja, quantidade de ART (Açúcar Redutor Total) da cana.

O Açúcar Redutor Total (ART) da cana é medido, via coleta de amostras em pontos distintos do caminhão, para que exista um controle total da recepção da matéria prima. Onde é determinado também o Açúcar Total Recuperável (ATR), com base nas análises efetuadas, para fins de pagamento (MARQUES, 2009).

Tudo isso, implicará no pagamento da cana aos fornecedores, controle dos processos industriais e, para os planejamentos industriais.

1.2.2 Limpeza

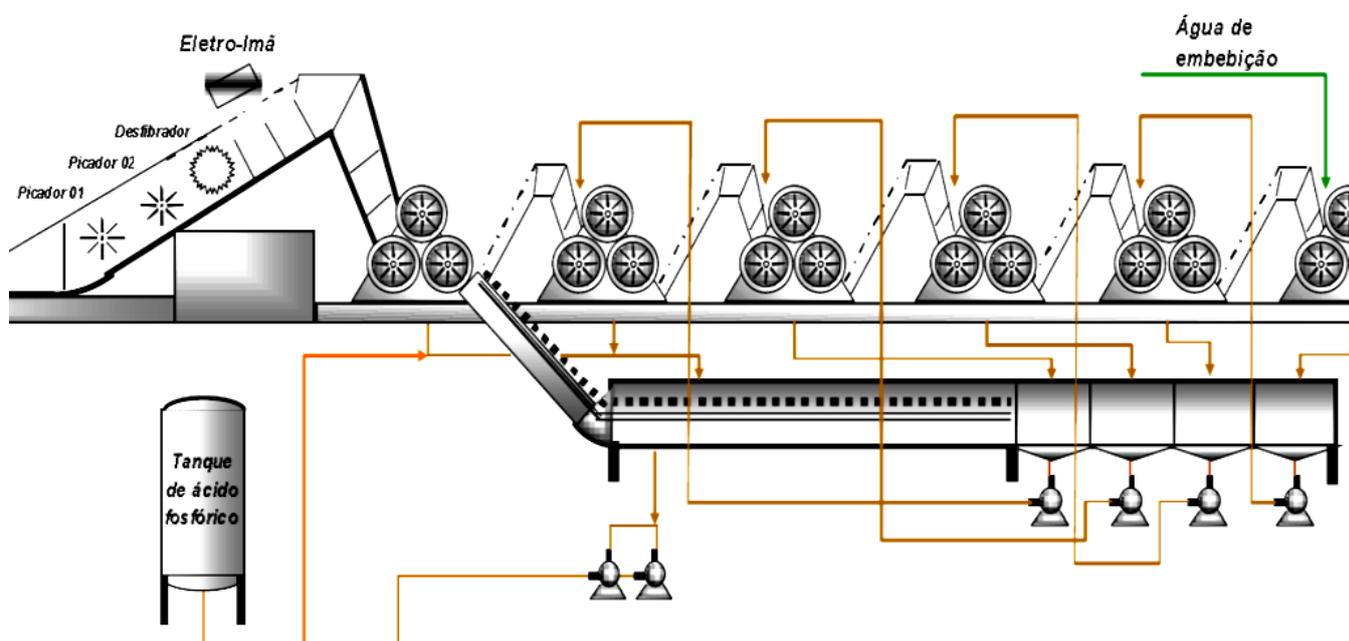
Nas usinas brasileiras, basicamente existem duas formas diferentes de limpeza da cana-de-açúcar. Uma para cana-de-açúcar, queimada e colhida inteira, e a outra para cana-de-açúcar, colhida mecanicamente.

Contudo, para a cana queimada, o Ministério da Agricultura, MAPA (2014, *web site*), dispõe claramente que:

Está previsto, ainda, um calendário para redução gradual, até 2017, da queimada da cana-de-açúcar em áreas onde a colheita é mecanizada, proibindo o plantio na Amazônia, no Pantanal, na Bacia do Alto Paraguai (BAP) e em áreas com cobertura vegetal nativa.

1.2.3 Moendas

Figura 1 – Setor de moendas.



Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

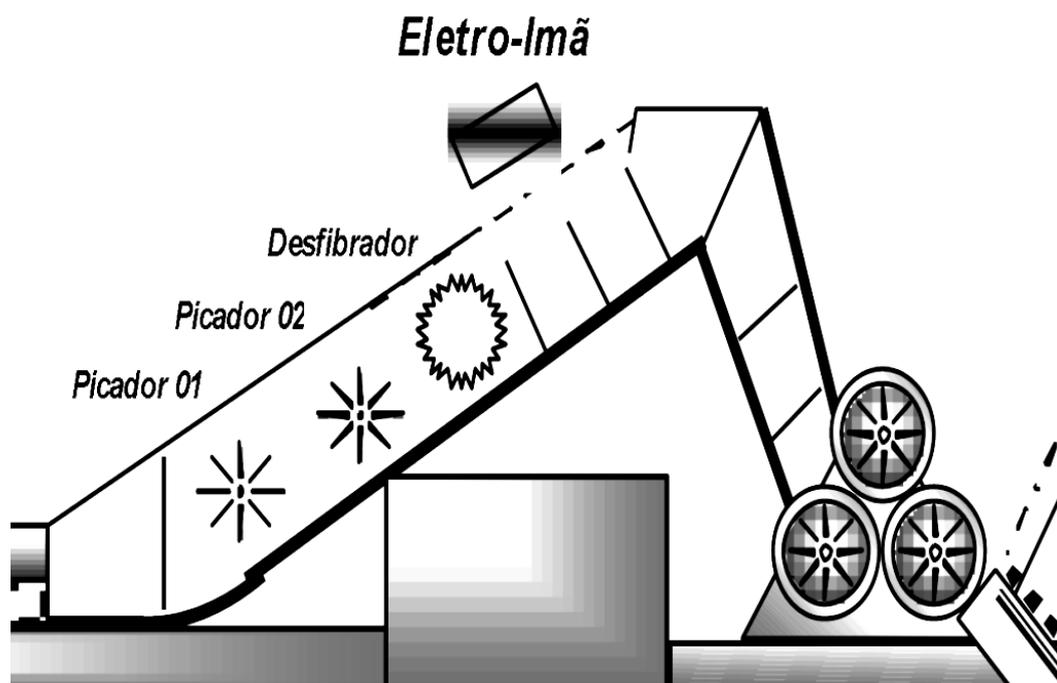
Uma vez limpa, inicia-se o processo e moagem da cana-de-açúcar, ou extração do caldo, Figura 1, basicamente implicando na separação do caldo e da fibra.

A cana resultante do processo anterior, é transportada via uma esteira de metal para um sistema de facas e picadores, sendo sucedidos por um desfibrador.

Desfibrada, a cana é encaminhada em uma esteira polimérica, onde será submetida à um eletroímã, que tem por função identificar e extrair, qualquer material ferroso que venha propiciar algum problema as moendas (MARQUES, 2009).

Nesse setor das moendas, em se tratando de um dos pontos cabais no processo, explicita-se por meio da representação de UDOP A (2012), na Figura 2, o Sistema de facas, picadores e desfibrador, com a presença do eletroímã.

Figura 2 – Sistema de facas, picadores e desfibrador.



Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

Marques (2009) descreve ainda, que processo de separação do caldo da cana-de-açúcar, pode ser realizado de duas maneiras: moagem ou difusão.

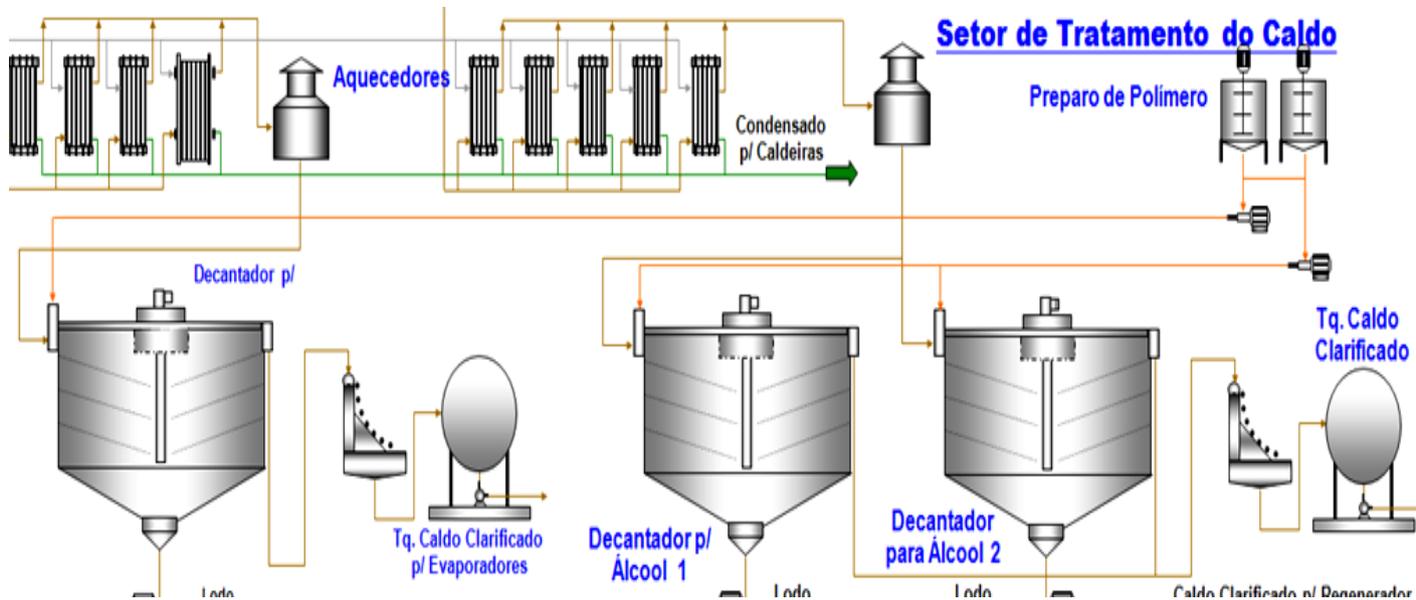
Seguindo o raciocínio, Ramos (2010), diz que, a moagem, trata-se do processo clássico, antigo e comum nas indústrias brasileiras, consistindo em retirar o caldo da cana por meio de moenda.

Enquanto a extração por difusores, é visualizada por Santos (2010, p.18):

Diferente das moendas que pressionam a cana para que o caldo seja expelido, no difusor o caldo é deslocado por água em fluxo contracorrente, que passa entre as células e arrasta os açúcares contidos na cana. O difusor realiza a difusão que é a separação por osmose em apenas 3% das células, que são as células que não foram rompidas, nas demais células é feita a lixiviação, que consiste no arraste sucessivo de sacarose pela água. O desaguamento do bagaço é feito por um terno de moenda no fim do difusor.

1.2.4- Tratamento do caldo

Figura 3 – Estação de tratamento do caldo.



Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

O caldo proveniente do processo anterior, ainda com grande quantidade de impurezas, precisa ser eliminado, tanto para se obter uma boa qualidade de açúcar, quanto eficiência na da produção do etanol.

Nesse processo (Figura 3), inicialmente o caldo passa por uma peneira, pois torna-se necessário para a remoção de partículas sólidas maiores.

Para a remoção das partículas consideradas menores, existe uma sequência de tratamentos, de caráter físico-químico, no qual precisam ser realizados (aquecimento, calagem, sulfitação, decantação, etc.) (RAMOS, 2010).

1.2.5- Clarificação do caldo

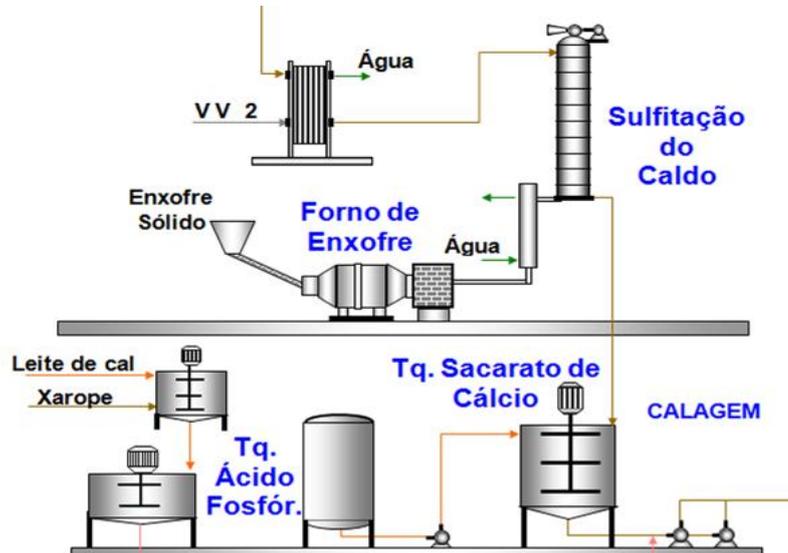
Marques (2009), dispõe que um importante processo a ser realizado no caldo, é a passagem pelo decantador para seja separado as impurezas.

A decantação, é realizada pela adição de alguns polímeros e ácidos (especificamente o ácido fosfórico), no qual aglutinam e aumentam o peso das partículas impuras e as suspendendo e precipitando de forma mais rápida.

A partir deste procedimento, o caldo, é chamado nesta fase de “caldo clarificado”.

As impurezas que formam uma espécie de lodo, serão enviadas para tratamento em filtros, prensas, entre outros, Figura 4, para que consiga retirar pequenas porções de açúcar, no qual encontram-se nesse material (RAMOS, 2010).

Figura 4 – Processo de clarificação do caldo.



Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

1.3 Processo de produção do etanol

Com exceção da operação de sulfitação, que é realizada para inibir reações que causam formação de cor, coagulação, e formação do precipitado CaSO_3 (sulfito de cálcio); não existe diferenciação nos processos de fabricação do açúcar e do etanol. É, a partir deste momento, que os procedimentos dos produtos diferenciam-se (DALBEM *et al.*, 2006 apud MARQUES, 2009).

1.3.1 Mosto

Basicamente, o mosto é uma solução açucarada cuja concentração foi corrigida para que a fermentação fosse facilitada.

Em seu preparo, o caldo clarificado, quente, troca calor com o caldo misto, frio, proveniente do processo de tratamento. Em seguida, o caldo clarificado é submetido a outro trocador de placas, que é utilizado água fria como fluido de resfriamento (MARQUES, 2009).

1.3.2 Preparo da levedura

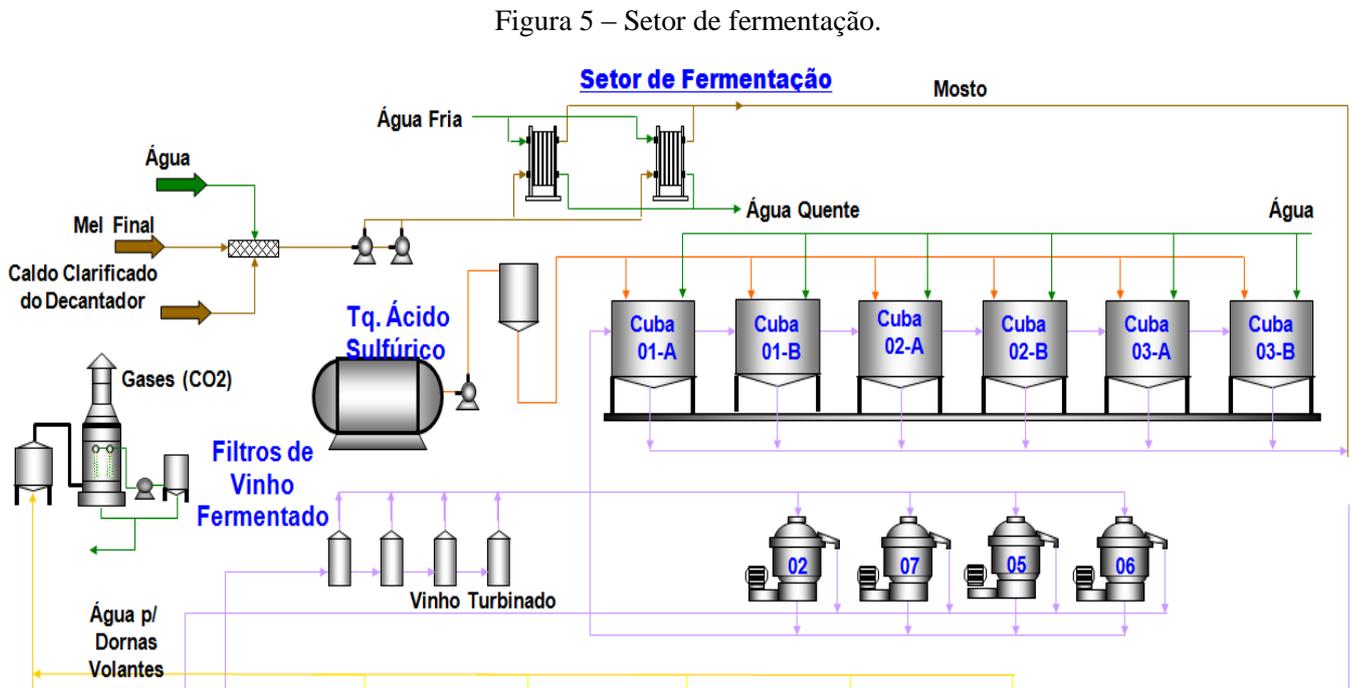
Todo o preparo da levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) utilizado no processo é de considerável complexidade, divide-se em duas fases: a laboratorial e a industrial.

A primeira basicamente é constituída por preparo e intervenções laboratoriais sobre as propriedades da levedura. A segunda implica no reciclo de levedura, existente na maior parte das usinas do Brasil (RAMOS, 2010).

1.3.3 Fermentação

A fermentação, é a umas das fases mais complexas e importantes da fabricação do etanol. Nessa fase, ocorre a transformação do caldo de cana-de-açúcar em etanol, isso, mediante a submissão do caldo, às leveduras.

Na Figura 5, ilustrada por UDOP A (2012), verifica-se:



Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

É na fermentação que, existe a união da levedura com o mosto. Contudo, antes de receber o mosto; a levedura, recebe mais um tratamento, com intenção de criar condições melhores para produção. É adicionado água, ácido sulfúrico e alguns produtos bactericidas (antibióticos). Esse tratamento denomina-se pé-de-cuba (RAMOS, 2010).

Em sequência do processo, o mosto e o pé-de-cuba são misturados e enviados aos tanques e/ou dornas de fermentação. A proporção dessa mistura, é 2:1.

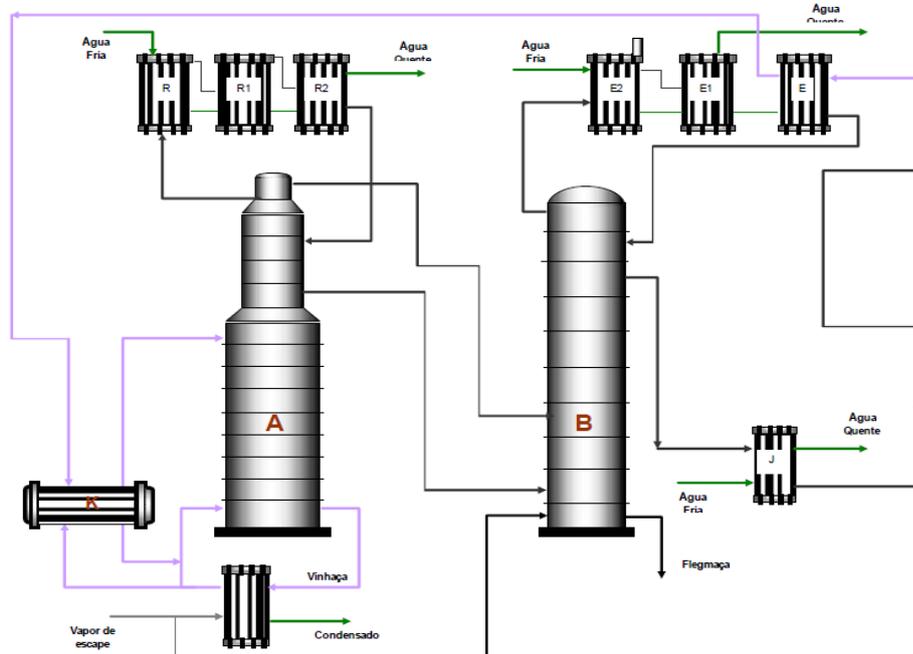
Contudo, Marques (2009, p. 47, grifo nosso), afirma algo categoricamente muito interessante, sobre as perdas industriais no setor de fermentação:

No processo de fermentação ocorre a maior perda industrial da produção de álcool. A eficiência típica da reação de transformação de ART em álcool na indústria brasileira situa-se na faixa de 85% a 90%. Ou seja, aproximadamente 10% a 15% do total de ART que potencialmente poderia ser transformado em álcool, não é recuperado.

1.3.4 Destilação

Tal processo, implica em realizar a separação da mistura homogênea, resultante da etapa anterior. Utilizando uma sequência de “pequenas destilações” (Figura 6), no qual existe um aumento da quantidade de álcool nos vapores, atinge-se um ponto de concentração, eliminando desta forma, possíveis impurezas.

Figura 6 – Setor de destilação I.

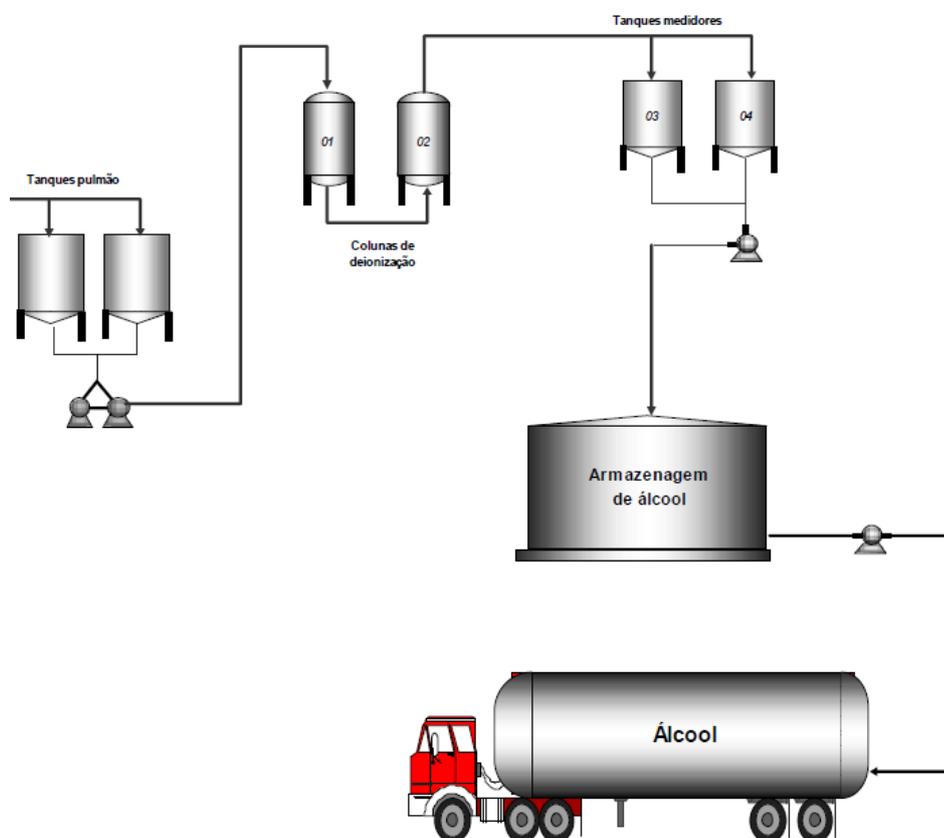


Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

Ao final do ciclo de produção do etanol, o produto é enviado aos tanques (Figura 7), onde passarão por mais alguns processos de acabamento, resfriamento, dosagem e

armazenagem. Em sequência, o produto já poderá ser carregado e transportado para os pontos comerciais.

Figura 7 – Setor de destilação II.



Fonte: Adaptado UDOP A (2012, Anexo A).

1.3.5 Tipos de etanol

Penido Filho (1980) e Scandiffio (2005), dizem que pode-se dividir o etanol em categorias. Sendo assim, destacam-se as principais: o AEHC – Álcool Etílico Hidratado Carburante (com pureza variando entre 92,8% e 93,8%); o AEAC – Álcool Etílico Anidro Carburante (com o mínimo de pureza em 99,3%); o Neutro (com sua pureza mínima em torno de 94,2%) e; o de uso Industrial (com a pureza variando entre 93,4% e 94,2%)

Cada um desses tipos de etanol (os etílicos), possuem um preço diferente de venda, em julho de 2014 no Estado de São Paulo o Indicador CEPEA/ESALQ apontou um fechamento referente ao mês de julho/2014 de R\$ 1,2291/litro (sem a inclusão de impostos) para o Álcool Hidratado (ESALQ/USP B, 2014).

E para o Álcool Anidro R\$ 1,3739, valor também sem a inclusão de impostos (ESALQ/USP A, 2014).

1.4 Considerações finais

Nesse capítulo, visualizou-se de maneira descritiva, todo o processo de fabricação do etanol, por meio da principal matéria prima utilizada no Brasil, a cana-de-açúcar.

A complexidade verificada nesses procedimentos de produção, fez com que, a abordagem fosse cuidadosa e específica, tudo isso, para que apreciação do leitor, viesse a tornar-se mais completa.

Desta forma, a inserção do leitor no ambiente produtivo, é de vital importância, para seu amplo entendimento.

Dentre as principais fases da fabricação do etanol, no setor da fermentação, localiza-se a composição do mosto. Em menção à Marques (2009, p. 47, grifo nosso), destaca-se novamente suas colocações, sobre perdas industriais nesse setor:

No processo de fermentação ocorre a maior perda industrial da produção de álcool. A eficiência típica da reação de transformação de ART em álcool na indústria brasileira situa-se na faixa de 85% a 90%. Ou seja, aproximadamente 10% a 15% do total de ART que potencialmente poderia ser transformado em álcool, não é recuperado.

Posteriormente, com a disposição de ferramentas, técnicas e trabalhos realizados, acontecerá uma análise com maior amplitude, dos principais parâmetros abordados.

No próximo capítulo, a demonstração de ferramentas e métodos, fundamentará uma proposta, no qual serão demonstrados para a promoção do objetivo principal, a otimização da produção no processo.

CAPÍTULO 2 – PESQUISA OPERACIONAL

A história da Pesquisa Operacional (PO), segundo McCloskey; Trefethen (1956, p 27), dispõe: “Como forma organizada de pesquisa, a Pesquisa Operacional (PO), começou pouco antes do início da Segunda Guerra Mundial”.

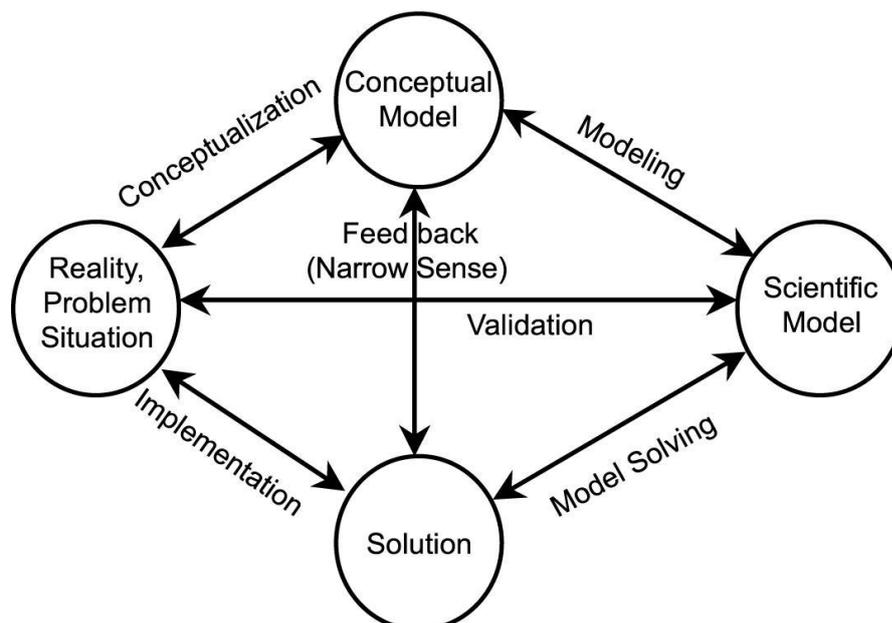
Com o término da guerra, reuniu-se históricos de diversos grupos de pesquisa, mas a grande maioria de documentos, nunca chegou a ser publicada. No entanto, o que conseguiu-se organizar e escrever, foi o suficiente da resultante do trabalho desses grupos, para que a PO chamasse para si a atenção generalizada (McCLOSKEY; TREFETHEN, 1956).

A PO, define-se de muitas formas. Colin (2013, Prefácio VII), descreve sobre as características que devem constar em todas elas (em ordem de importância): “uso de métodos matemáticos para resolver problemas, desejo constante por otimização e orientações a aplicações”.

Como objeto de auxílio, a PO utiliza informações provenientes de todos os elementos do sistema de ação, inclusive as informações da própria organização e as relativas ao meio ambiente e concorrência.

Contextualizando a ação da PO, na Figura 8, ilustrado por Mitroff *et al.* (1974), pode-se verificar as interações, nela disposta:

Figura 8 – Modelo tradicional de pesquisa operacional.



Fonte: (MITROFF *et al.*, 1974, p. 46-58).

2.1 Modelo

Segundo Caixeta-Filho (2014, p.9), sobre os conceitos básicos de modelagem: “Uma das preocupações básicas da Ciência, ao longo dos tempos, diz respeito à observação, reprodução e aprimoramento de fenômenos de naturezas das mais distintas”.

A princípio, um modelo é muito grosseiro, contendo poucos aspectos importantes; mas a medida em que cresce o entendimento, ele pode ser mensurado até atingir complexidade necessária, para que se resolvam casos de interesse prático (McCLOSKEY; TREFETHEN, 1956).

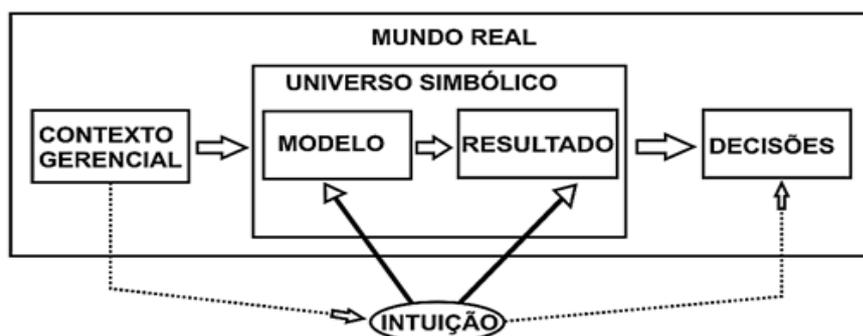
No entanto, Caixeta-Filho (2014) diz ainda que, a partir da compreensão desses fenômenos e, eventualmente, controle, haveriam condições de se obter certo nível de certeza nas previsões em eventos, mesmo que essas condições sejam pequenas.

McCloskey; Trefethen (1956), descrevem, que na PO, a pesquisa não consiste puramente em uma simples busca estatística de correlações. A observação e a construção de modelos hipotéticos, caminham juntas, existindo então uma íntima relação entre o progresso de hipóteses-tentativas, até a teoria final definitiva, para ampliação do que se constitui o entendimento científico. Desta forma, pode-se considerar a PO, como Pesquisa ao “Nível” Operacional.

Categoricamente, Caixeta-Filho (2014, p. 10, grifo nosso), dispõe que sobre a intenção dos modelos: “modelos, de maneira geral, são representações idealizadas para situações do mundo real. Propiciam a aquisição de novos conhecimentos e facilitam o planejamento e previsões de atividades, **sempre tendo como objetivo final a VERDADE**”.

Em contextualização referente a afirmação acima, na Figura 9, a BWS Consultoria em seu *web site*, disponibiliza por meio de Silva (2011), a representação da modelagem:

Figura 9 – A modelagem.



Fonte: SILVA (2011, *web site*).

2.2 Programação linear

A Programação Linear (PL), abordada por Colin (2013, p. 1), implica, “De todas as técnicas gerenciais à disposição hoje em dia, a Programação Linear (ou PL) é uma das mais poderosas”.

Colin (2013), ainda dispõe que, alguns usuários a enxergam como uma condição fundamental para lucratividade e sobrevivência no longo prazo, outros como fontes de vantagem competitiva.

Em linhas gerais, a PL define um problema no qual envolve alocação ótima de algum tipo de recurso escasso para realização de atividades.

McCloskey; Trefethen (1956, p. 230, grifo do autor), descrevem de forma minuciosa a formulação de problemas de PL e os aspectos englobados pela mesma, também visualizados na Equação 1:

O **problema de programação linear** geral consiste na determinação de variáveis não-negativas que otimizam uma forma linear sujeita a restrições lineares. A forma linear a ser otimizada é chamada de **objetivo** do problema. O termo otimização é entendido como significado a determinação de variáveis que fazem o objetivo um máximo ou um mínimo. Uma **restrição linear** nas variáveis λ_j é entendida como significando uma desigualdade em qualquer direção ou uma igualdade entre uma forma linear nessas variáveis é uma constante. Restrições da forma $\lambda_j \geq 0$, são chamadas restrições **não-negativas**. Restrições da forma:

$$\sum_j \alpha_j \lambda_j \leq b, \sum_j \alpha_j \lambda_j \geq b \text{ or } \sum_j \alpha_j \lambda_j = b \quad (1)$$

que não são restrições não-negativas, são chamadas **restrições funcionais**. Qualquer conjunto de quantidades que satisfaz às restrições não-negativas e funcionais é chamado **solução viável** do problema de programação linear. Qualquer solução viável que otimiza o objetivo é chamada **solução ótima**. O problema de programação linear geral é, assim, da forma:

$$\lambda_j \geq 0 \quad (2)$$

$$\sum_j \alpha_{ij} \lambda_j \leq, =, \geq b_i \quad (3)$$

$$\sum_j c_j \lambda_j = \text{max. ou min.} \quad (4)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

As técnicas no qual essa modalidade de programação dispõe, são muito importantes e permitem, resolver muitos problemas. O planejamento de produção, é um exemplo de uso prático e muito difundido.

2.3 Programação inteira

Segundo Colin (2013, p. 174): “A criação da programação inteira foi uma consequência da incapacidade da PL de oferecer solução viáveis para alguns problemas importantes”.

Em seu processo de modelagem, a Programação Inteira (PI), assemelha-se muito com a PL. A principal diferença fica por conta de que ao menos, partes das variáveis são números inteiros. Colin (2013, p. 177), no entanto, destaca duas importantes classes de números inteiros:

Os números inteiros genéricos (1, 2, 3, ...) e os números inteiros 0 e 1. Os números 0-1 representam fenômenos do tipo sim e não, presença e ausência, verdadeiro e falso, aberto e fechado, etc.

Ralph Gomory, em 1957, baseou-se em dois pontos para adaptar seu raciocínio a PI, e posteriormente em 1958, criar a linguagem FORTRAN:

O raciocínio se baseou em dois pontos: (i) se a PL oferece soluções ótimas (máximas) que podem ser fracionárias, a solução será sempre tão boa quanto, ou melhor, que a solução inteira (pois a solução inteira é um subconjunto da solução contínua) e (ii) como a função-objetivo multiplicava e somava parâmetros e variáveis inteiras, a resposta deveria ser um número inteiro. Colin (2013, p. 174).

Mensura-se, diversas aplicações a PI, relacionando a problemas de: investimento, custo fixo, alocação de armazéns, sequenciamento de tarefas, roteamento de veículos, etc.

2.4 Programação não linear

Dentre as programações matemáticas, a Programação Não Linear (PNL) é possivelmente, o assunto que envolve os problemas de maior complexidade. Contudo, Colin (2013, p. 277) menciona que, “embora sejam os mais difíceis de resolver, os fenômenos não lineares são os mais comuns na natureza e bastante comuns nas empresas.”

Caixeta-Filho (2014, p. 108) dispõe que, “Além disso, diferentemente da Programação Linear, não existe um algoritmo “universal” para programação não-linear, uma vez que os graus e complexidades de não-linearidade podem ser bastante diversificados.”

Ressalta-se também que, a PNL não implica em garantias da obtenção do chamado ótimo global, mas somente de pontos ótimos locais. A PNL basicamente, admite as relações que são observadas empiricamente, variações de não proporcionalidade em custos, resultados, processos, características de qualidade, etc. (CAIXETA-FILHO, 2014).

Como exemplo de PNL, Colin (2013), apresenta problemas com funções-objetivo não lineares envolvendo: época ótima do abate de gado, taxa ótima de crescimento de uma empresa, mix da gasolina, entre outros.

2.5 Estudos de pesquisa operacional aplicada

Em PO, a criação e solução de problemas no computador, cresce rapidamente, de modo a tornar muito difícil a solução manual. Tem-se então uma infinidade de softwares que podem resolver problemas (COLIN, 2013).

Deve-se no entanto considerar que, um estudo de pesquisa operacional não é um plano, ou seja, um estudo de pesquisa operacional conduz conclusões e recomendações. Essas podem ser aceitas ou rejeitadas pelos gestores, que tem a responsabilidade de formular as diretivas, que serão determinadas pelos dirigentes (CAIXETA-FILHO, 2014).

Na Tabela 1, é demonstrado algumas recomendações de diretrizes para determinações e gestores e dirigentes, no que se refere a utilização de planilhas eletrônicas, instrumento muito utilizado para tomada de decisões no meio empresarial.

Tabela 1 – Recomendações da utilização de planilhas.

USAR PLANILHA	CORRELAÇÃO	NÃO USAR PLANILHA
Pequenas aplicações	Aplicações	Aplicações muito grandes
Muita rapidez não é importante	Rapidez	Muita rapidez é importante
Relativamente simples	Lógica	Relativamente complexa
Usa pouca interface	Interface	Outros softwares e bases de dados
Relativa estabilidade das dimensões	Dimensão	Necessidade frequente de alterações
Bastante flexível e fácil de fazer	Modelagem	Sempre requer especialistas

Fonte: Adaptado (COLIN, 2013 p. 45)

Colin (2013), dispõe também, sobre os softwares de grande flexibilidade utilizados como planilha ou suplementos (Microsoft Excel, Lotus 1-2-3, Premium Solver Platform,

Evolver, What's Best!, AIMSS, AMPL, GAMS, MATLAB, MPL), mensurados para auxílio de simulação de cálculos e parâmetros gerais.

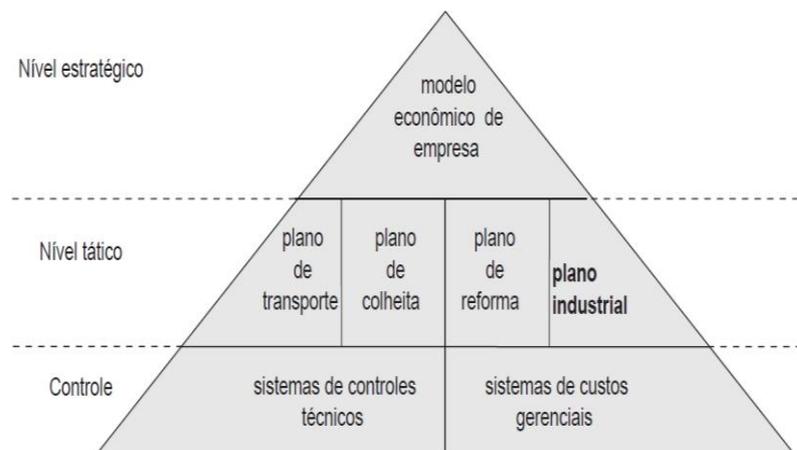
2.5.1 Estudo de caso 1 – otimização no planejamento da produção em usinas

O estudo de caso a ser analisado, foi desenvolvido por Rafael Piatti Oititica de Paiva (Usina Santa Clotilde S/A) e Reinaldo Morabito (Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar), intitulado “Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usina de açúcar e álcool”.

Neste estudo de caso, buscou-se a análise das diretivas, métodos e ferramentas no qual os autores, basearam-se para elaboração de seu modelo.

Inicialmente, Paiva; Morabito (2007), identificaram o crescimento da dificuldade no qual profissionais de PCP, estão encontrando na estratégia de diversificação nos processos de produção de usinas e destilarias, e iniciaram uma coleta geral de informações (Figura 10).

Figura 10 – Níveis de PCP.

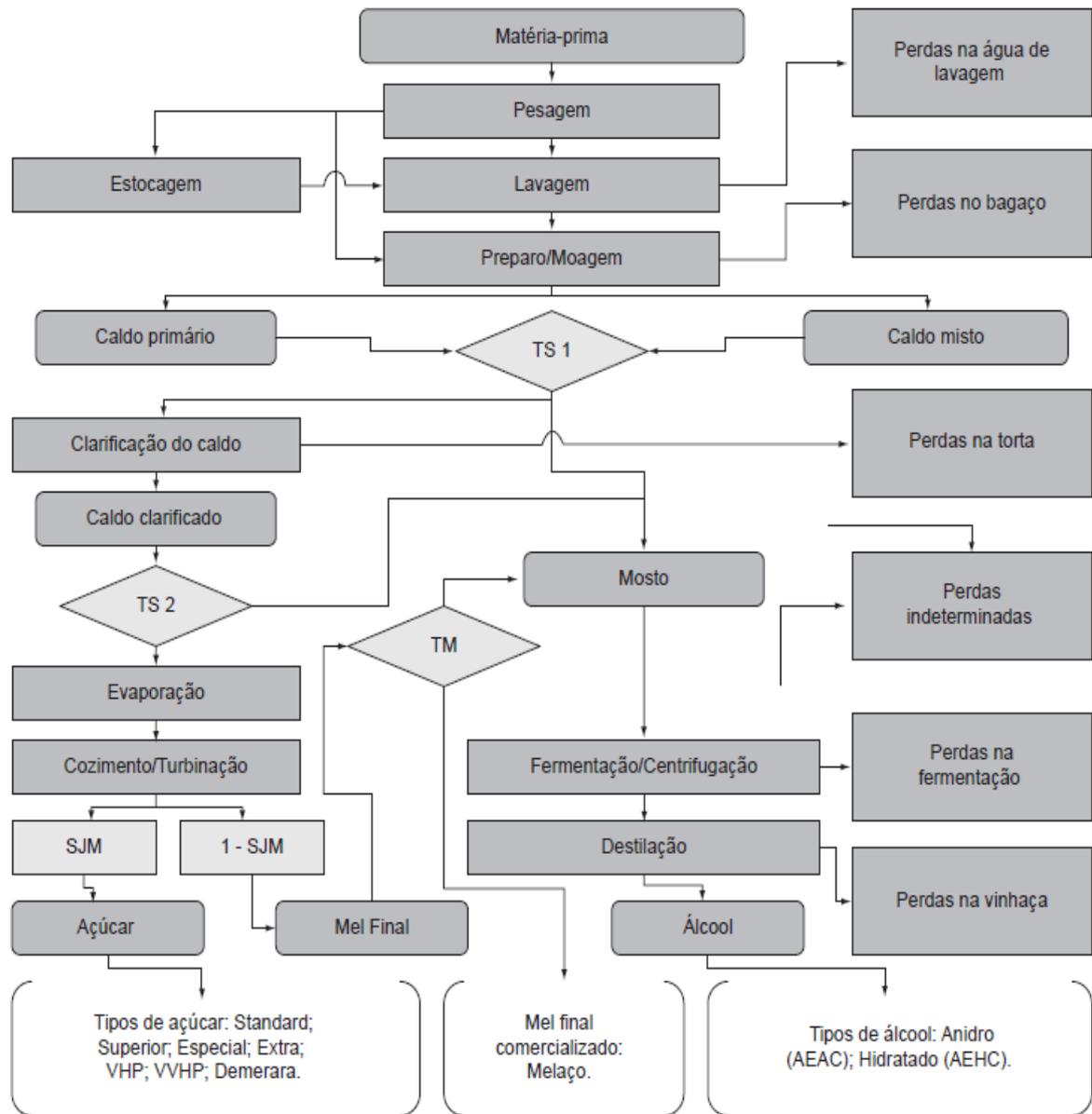


Fonte: (BRUNSTEIN; TOMIYA, 1995 apud PAIVA; MORABITO, 2007, p. 27).

Moldando-se em modelos clássicos, utilizados em processos de produção da indústria sucroalcooleira, Paiva; Morabito (2007), focaram seus parâmetros, na produção da usina estudada.

Para isso, tiveram que definir, todo o processo de produção do açúcar e do álcool (Figura 11), representando-a em fluxograma toda a planta da indústria por eles estudada.

Figura 11 – Fluxograma de produção.



Fonte: PAIVA; MORABITO (2007, p. 28).

Feito isso, começaram a elaboração de seu modelo. No entanto, Paiva; Morabito (2007, p. 30), tiveram que definir índices para o modelo matemático proposto:

k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool ($k = 1, 2, \dots, 252$);

t Períodos: determinados pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar ($t = 1, 2, \dots, 23$);

p Produtos fabricados: produtos que podem ser produzidos pela empresa, tanto na fábrica de açúcar quanto na destilaria de álcool ($p = \text{Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara, Melaço, AEHC, AEAC}$).

Paiva; Morabito (2007, p.30), verificaram também, a existência da subdivisão dos produtos e seus coprodutos, assim, criaram sub índices, definidos:

- ps Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar (ps = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara);
- pa Subconjunto de produtos da destilaria (pa = AEHC, AEAC);
- px Subconjunto de resíduos da usina (px = Melaço);
- m Matérias-primas: determinadas de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana provêm (m = cana própria - prop, cana arrendada - arr, cana acionistas - cací, cana fornecedor - cforn). Ainda, é necessário criar um subconjunto das matérias-primas próprias (subíndice mp), como segue:
- mp Subconjunto de canas que são administradas pela própria usina (mp = cana própria, cana arrendada);
- f Serviços de transporte: determinados de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado (f = transporte próprio - Fprop, transporte condomínio - Fcond, transporte terceirizado - Fterc); e
- e Locais de estoque: determinados de acordo com o local do estoque (e = estoque próprio - Eprop, estoque terceirizado - Eterc).

As gerações de parâmetros para o modelo, nesta fase, se tornaram essenciais. Desta forma, Paiva; Morabito (2007, p. 30 e 31), demonstraram que conseguiriam enfim parametrizar uma matriz de rendimentos, via manipulação das seguintes diretrizes:

- BMF Brix do mel final adotado pela fábrica (°Brix);
- PzaM Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%);
- TMk Desvio de melaço para a destilaria em cada processo k (valor unitarizado);
- TSk Determinação do desvio de caldo para a fábrica em cada processo k - (valor unitarizado);
- Polk Polarização dos açúcares produzidos em cada processo k (°Z);
- Umidk Umidade dos açúcares produzidos em cada processo k (%);
- Rpa Rendimento estequiométrico dos álcoois pa (l/100 kg ART);
- MAPpa,k percentual dos álcoois pa produzidos em cada processo k (%);
- MSPps,k Percentual dos açúcares ps produzidos em cada processo k (%);
- Elbtit Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool (%);
- Efdt Eficiência de fermentação/centrifugação e destilação na produção de álcool (%);
- Pct Pol da cana em cada semana t (%);
- PzaCt Pureza da cana em cada semana t (%); e
- ARt Açúcares redutores contidos na cana em cada semana t (%).

Em sequência, Paiva; Morabito (2007, p. 31), parametrizaria agora sua matriz de

custos industriais, utilizando as seguintes diretrizes:

cproc	Custo de produção de cada kg ART em cada processo da USC (u.m./kg ART);
ARm	Açúcares redutores contidos no mel final produzido pelos processos da USC (%);
Fatorpa	Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (Adimensionais);

E como última sequência de parametrizações, Paiva; Morabito (2007, p.32), elaboraram sua matriz de custos agrícolas:

carr	Custo médio dos contratos de arrendamento (t de cana/ha);
Δm	Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana tipo m (u.m./t cana);
ATRrarr	ATR padrão para a cana arrendada (kg/t);
ATRt	ATR contido na cana (kg/t);
pATRt	Preço do ATR no período de fornecimento (u.m./kg);
prodamp,t	Produtividade agrícola de cada tipo de cana mp em cada período t (t/ha);

Até este ponto do processo, verifica-se a utilização das informações, trazidas de um ambiente real, para parametrização de um modelo inicialmente hipotético, no qual os autores concentraram seus estudos.

A presença constante das técnicas de programação, é verificada sistematicamente, pois as diretrizes manipuladas, englobam conceitos das programações linear, inteira e não linear.

Paiva; Morabito (2007, p. 33), enfim, propuseram o modelo matemático (SPDL/PU2). Tanto para sua função objetivo, Figura 12; quanto para suas restrições, Figura 13. Onde de uma forma generalizada, preveem, as variáveis de decisão: “P produtos, K processos, M matérias-primas, F tipos de transporte, E tipos de estoque e T períodos”.

Figura 12 – Função objetivo.

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e h_{s_{pe}} \cdot I_{pe} \right) \right)$$

Fonte: PAIVA; MORABITO (2007, p. 33).

Figura 13 – Restrições.

$$\begin{aligned} \sum_c I_{pet} &= \sum_c I_{p,e,t-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DS_{pet}, \\ p &= Standard, \dots, AEAC; t = 1, \dots, T \\ \sum_k X_{kt} &= 1, t = 1, \dots, T \\ \sum_m M_{mt} &= \sum_f M_{ft} = \sum_k M_{kt} = M_t, t = 1, \dots, T \\ Disp_{mt} &= Disp_{m,t-1} - M_{m,t-1} \geq M_{mt}, m = prop, \dots, \\ &cforn; t = 1, \dots, T \\ \sum_m Disp_{mt} &= \sum_t M_t \\ M_t^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} &\leq M_t \leq \\ M_t^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100}, t &= 1, \dots, T \\ \sum_p \sum_k VC_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t + Cgiro_t &\geq \\ \left(\sum_m C_{mt} \cdot M_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M_{ft} \right) & \\ + \sum_k CK_{kt} \cdot M_{kt} + \sum_p \sum_c h_{pet} \cdot I_{pet} &, t = 1, \dots, T \\ M_{cforn,t}^* + M_{cacl,t}^* + M_{cout,t}^* &\leq \alpha_t \cdot M_t, t = 1, \dots, T \\ M_{ft}^* &\leq \frac{\beta_{ft}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \cdot CT_f, f = \\ Fprop, \dots, Fterc; t &= 1, \dots, T \\ I_{pet} &\leq Cest_{pe}, p = Standard, \dots, AEAC; \\ e &= Eprop, Eterc; t = 1, \dots, T \\ M_{kt}^* &\leq M_{kt}^{\max} \cdot X_{kt}, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \\ X_{kt} &\in \{0,1\}; M_t \geq 0; M_{mt} \geq M_{ft} \geq 0; M_{kt}^* \geq 0; \\ Disp_{mt} &\geq 0; I_{pet} \geq 0 \end{aligned}$$

Fonte: PAIVA; MORABITO (2007, p. 33).

Para resolução do modelo, utilizaram a técnicas de Programação Mista, com auxílio da linguagem de modelagem GAMS com suplemento o solver CPLEX.

Após validar os resultados, Paiva; Morabito (2007 p. 37) conseguiram afirmar que o modelo, “poderia auxiliar de forma importante no planejamento de produção de usinas, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade em análises realizadas, visto a grande gama de fatores e parâmetros de produção utilizadas para elaboração do modelo”.

A complexidade prevista nesse modelo, mediante as informações abordadas, é uma prova real da dificuldade, no qual as elaborações de modelos sujeitam-se.

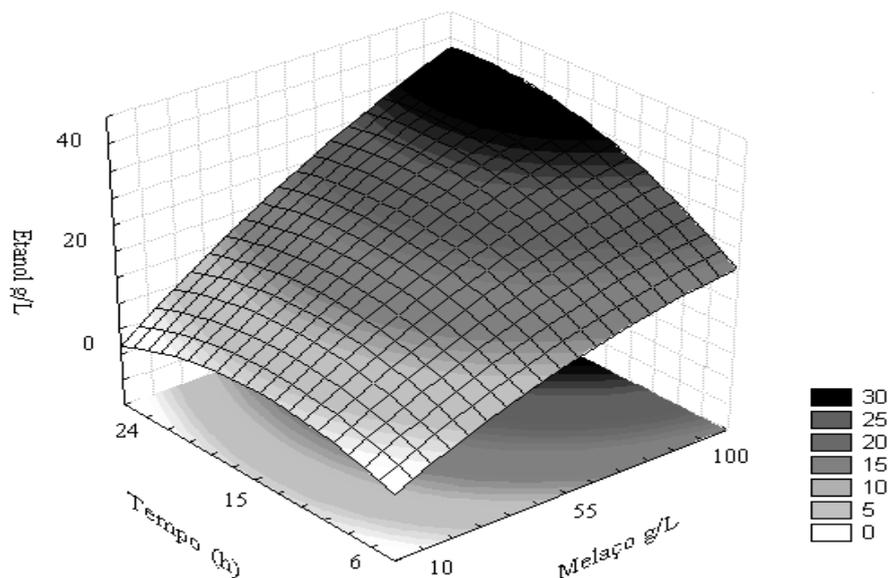
2.5.2 Estudo de caso 2 – otimização na produção do etanol

O estudo de caso desenvolvido por Doumit Camilios Neto, João Batista Buzato, Marcos Roberto Oliveira, alunos do Mestrado em Biotecnologia da UEL - Universidade Estadual de Londrina, com a colaboração da docente Maria Antonia Pedrine Colabone Celligoi, dessa mesma instituição; objetivou a otimização da produção do etanol no setor fermentação, por meio da bactéria *Zymomonas mobilis*.

Intitulado, “Otimização da produção de etanol por *Zymomonas mobilis* na fermentação do melaço de cana-de-Açúcar”, Camilios Neto; Buzato; Oliveira *et al.* (2005), dentre outras, trabalharam com a inclusão de elementos gráficos em sua proposta de otimização.

Para isso, aplicaram uma metodologia de superfície de resposta (MSR) e alcançaram, conforme verifica-se na Figura 14, um bom ajuste da metodologia, em relação ao seu modelo de otimização.

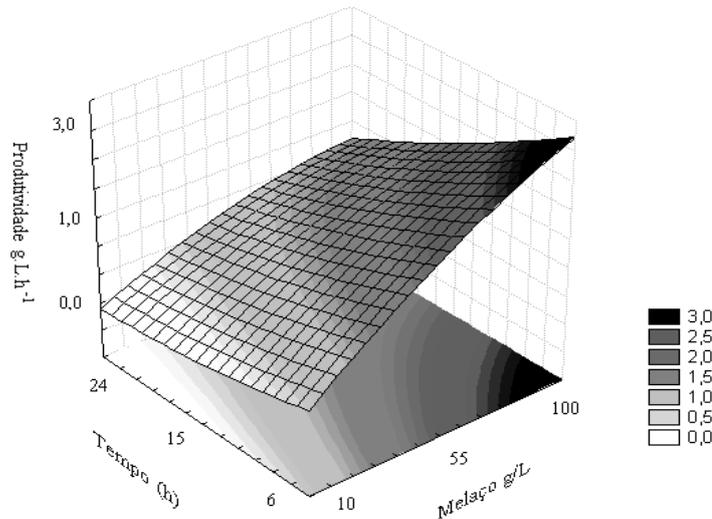
Figura 14 – Superfície de resposta da produção.



Fonte: (CAMILIOS NETO; BUZATO; OLIVEIRA *et al.*, 2005, p. 21)

Verificou-se também, Figura 15, que os autores também utilizaram a técnica para análise da produtividade:

Figura 15 – Superfície de resposta da produtividade.



Fonte: (CAMILIOS NETO; BUZATO; OLIVEIRA *et al.*, 2005, p. 21)

Camílios Neto; Buzato; Oliveira *et al.* (2005), concluem afirmando que a técnica de superfície de resposta, apresentou-se como uma eficiente ferramenta de otimização, no qual, converteram um bioprocessamento (bactéria *Zymomonas mobilis*) à um modelo matemático (Superfície de Resposta), predizendo onde os parâmetros ótimos, serão provavelmente alocados.

Esse estudo de caso, dentre as várias variáveis de decisão que o mesmo implicou, demonstrou a inclusão de um elemento interessante, no que se refere, à modelagem.

A técnica utilizada pelos autores, entre outras, facilita a visualização e a contextualização das informações e da prospecção compreendida.

2.5.3 Estudo de caso 3 - aplicação de programação por metas

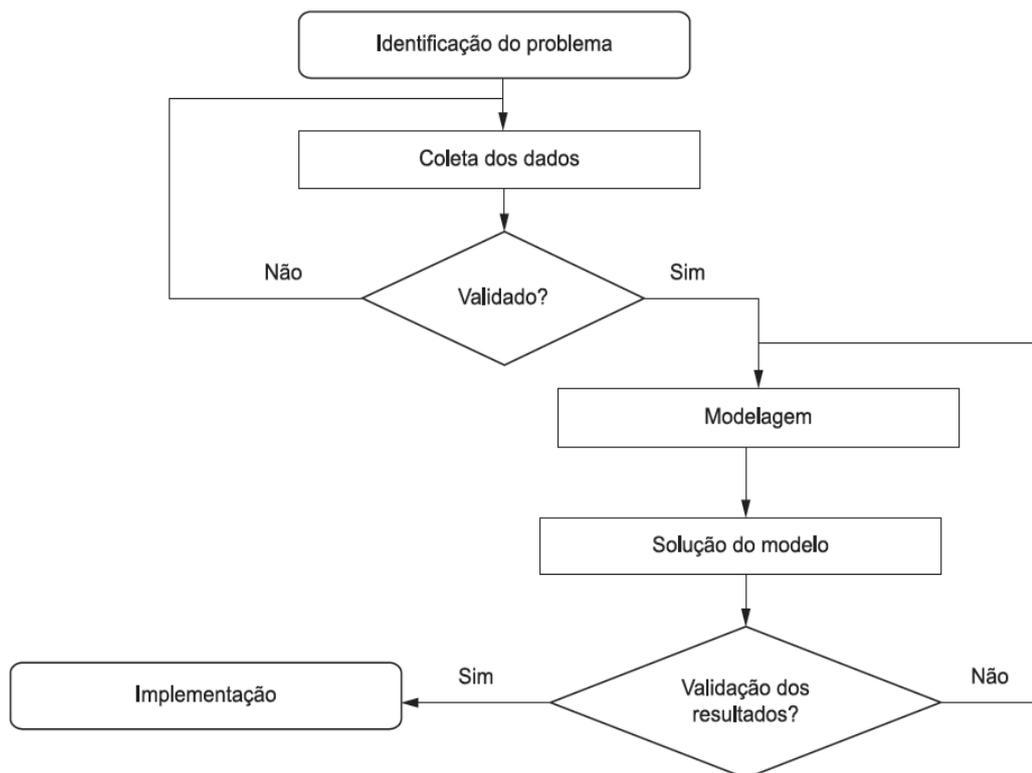
Desenvolvido por Aneirson Francisco da Silva, Fernando Augusto Silva Marins (Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP) e José Arnaldo Barra Montevechi (Instituto de Engenharia de Produção e Gestão – IEPG, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI), o estudo de caso proposto pelos autores, procurou-se testar e validar seu modelo via aplicação de programação por metas binária/mista.

Intitulado “Aplicação de programação por metas binária - mista em uma empresa do setor sucroenergético”, Silva; Marins; Montevechi (2013) em um âmbito geral, seguem as

mesmas diretrizes dos outros estudos de caso. Contudo, os autores concentram seus esforços, em uma aplicação pesada de programação por metas, quando a quantidade informações geradas, correspondem diretamente a amplitude do modelo disposto.

Na etapa de pesquisa, Silva; Marins; Montevechi (2013, p. 325) destacou, conforme verifica-se na Figura 16, as fases no qual sua pesquisa iria decorrer:

Figura 16 - Etapas da pesquisa.



Fonte: (SILVA; MARINS; MONTEVECHI, 2013, p. 325)

E validando seu modelo na usina investigada, Silva; Marins; Montevechi (2013) verificou que o modelo trazia: 1.259 variáveis binárias; 43.894 variáveis não negativas; 9.064 restrições lineares; 2.706 restrições não lineares.

Desta forma Silva; Marins; Montevechi (2013, p. 332), concluíram:

Os ganhos de qualidade no processo decisório, decorrentes da adoção do modelo, ficaram evidentes aos profissionais da usina, notadamente no que se refere ao aumento na margem de contribuição e na eficiência industrial, bem como a possibilidade de simular cenários futuros.

Esse modelo, basicamente demonstra de forma aplicada, as condições no qual as variáveis de um processo de produção otimizados vão encontrar.

Independentemente da aplicação aqui disposta, destaco a presença de 2.706 restrições não lineares (não controláveis), interferindo na implantação do modelo e ainda, a alta quantidade de variáveis manipuláveis.

2.6 Considerações finais

Nesse capítulo, procurou-se discutir a Pesquisa Operacional, sua história, conceitos, ferramentas e técnicas de programação.

A introdução do leitor, nesse tema complexo, tentou ser disponibilizada de uma forma simplificada, porém completa.

A aplicabilidade dessas técnicas, foi demonstrada de forma descritiva por meio de análises dos estudos de casos, onde presenciou-se três momentos: o primeiro, trazia a complexidade da otimização de um planejamento de produção; o segundo, uma disposição gráfica, de um modelo que previa a manipulação de uma bactéria para otimização de produção; e o terceiro, no qual existia um enfoque para programação em si e, que provou de maneira categórica, as variáveis no qual um estudo de otimização, está sujeito.

No próximo capítulo, será demonstrada a pesquisa exploratória, quando reuniu-se, todos os conceitos apresentados até aqui.

CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO

Gil (2009), descreve que a pesquisa exploratória, possibilita aprofundar análises nos limites de realidade específica e, que a pesquisa descritiva permite caracterizar a situação pela descrição de fatos e fenômenos que a compõem, indo além da coleta, ordenação e classificação de dados ou fatos, com objetivo de permitir o estabelecimento e a análise de relações entre eles.

Após a definição de todo o processo de produção do etanol, assim como vários pontos englobados pela Pesquisa Operacional, com as respectivas aplicações práticas; este capítulo apresenta uma pesquisa exploratória na Usina São Luiz S/A.

3.1 A empresa

Fundada em 1951, a Usina São Luiz S/A (Figura 17), é administrada pela segunda geração de filhos. Destacando-se como uma das organizações mais tradicionais da região de Ourinhos/SP, compõe o Grupo Quagliato, que geram em torno de 3.200 empregos diretos, sendo de vital importância para a região (USL A, 2009).

Figura 17 – Destilaria da empresa.



Fonte: Usina São Luiz S/A.

Em sua primeira safra, no ano de 1951/1952, sua produção foi de 802,5 toneladas de açúcar.

No entanto, na safra de 2013/2014, sua produção foi de 186.316 toneladas de açúcar e 83.581.000 litros de álcool, além de demais produtos, como levedura, energia elétrica, etc. Ou seja, em suas 32 safras ou 63 anos a empresa obteve crescimento de 77% para produção de açúcar e 100% para produção do etanol (esse percentual se deve, pela empresa não fabricar etanol nas primeiras safras) (USL A, 2009).

A Usina São Luiz S/A, participa de grandes grupos de apoio e extensão, veículos de informações, como: o CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, a UNICA - União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, a UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos, a UNESP – Universidade Julio Mesquita e a UDOP - Usinas e Destilarias do Oeste Paulista.

A comercialização dos seus produtos é feita, única e exclusivamente, desde 1959, pela Copersucar (Figura 18), uma das maiores cooperativas distribuidoras de açúcar e álcool do mundo.

Figura 18 – Copersucar.



Fonte: (COPERSUCAR, 2014, *web site*)

O setor industrial da empresa, segundo (USL B, 2009) em seu *web site*, possui suas capacidades estabelecidas:

- a) 11.500 toneladas de cana/dia;
- b) 18.000 sacas de 50 kg de açúcar/dia;
- c) 480.000 litros de álcool hidratado/dia;
- d) Fábrica de levedura seca, com capacidade produtiva de 12.000 sacas de 25 kg/dia;
- e) 80.000 Kg/dia de bagaço hidrolisado;
- f) Capacidade de produção de energia elétrica, estipulada em 16 megawatts/hora.

Os processos industriais da empresa, são executados com base nos princípios de higiene e segurança dos alimentos, adotando os requisitos exigidos pela:

- a) ISO 9001/2000;
- b) ISO 22000;
- c) BPF - Boas Práticas de Fabricação;
- d) BPL - Boas Práticas de Laboratório;
- e) Conceito 5S;
- f) Controle de pragas.

Paralelo a todas estas preocupações, e de extrema importância, a Usina São Luiz S/A, possui sistemas de proteção ao meio ambiente, por meio :

- a) De controles de emissões de gases pelas caldeiras;
- b) Utilização de águas em circuito fechado;
- c) Projetos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Efluentes Líquidos.

Tudo isso, em cumprimento ao protocolo ambiental assinado pela empresa, objetivando dentre os mais diversos aspectos, a eliminação da queimada da palha da cana; ou seja, a empresa contribui cada vez mais, para a preservação do meio ambiente, conforme seu logo (Figura 19) demonstra.

Figura 19 - Ação de conscientização.



Fonte: Usina São Luiz S/A.

3.2 Objetivos

Na Usina São Luiz S/A, o etanol é produzido a partir de um processo de fermentação do caldo da cana-de-açúcar.

Sendo assim, a empresa opta por trabalhar apenas com o AEHC – Álcool Etílico Hidratado Carburante ou EHC – Etanol Hidratado Carburante (nome de tratamento na empresa) de acordo com as especificações ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, para utilização nos veículos a álcool e bi combustíveis.

Com uma breve apresentação da empresa, o esforço agora, refere-se a um ponto cabal da essência do estudo proposto, a otimização.

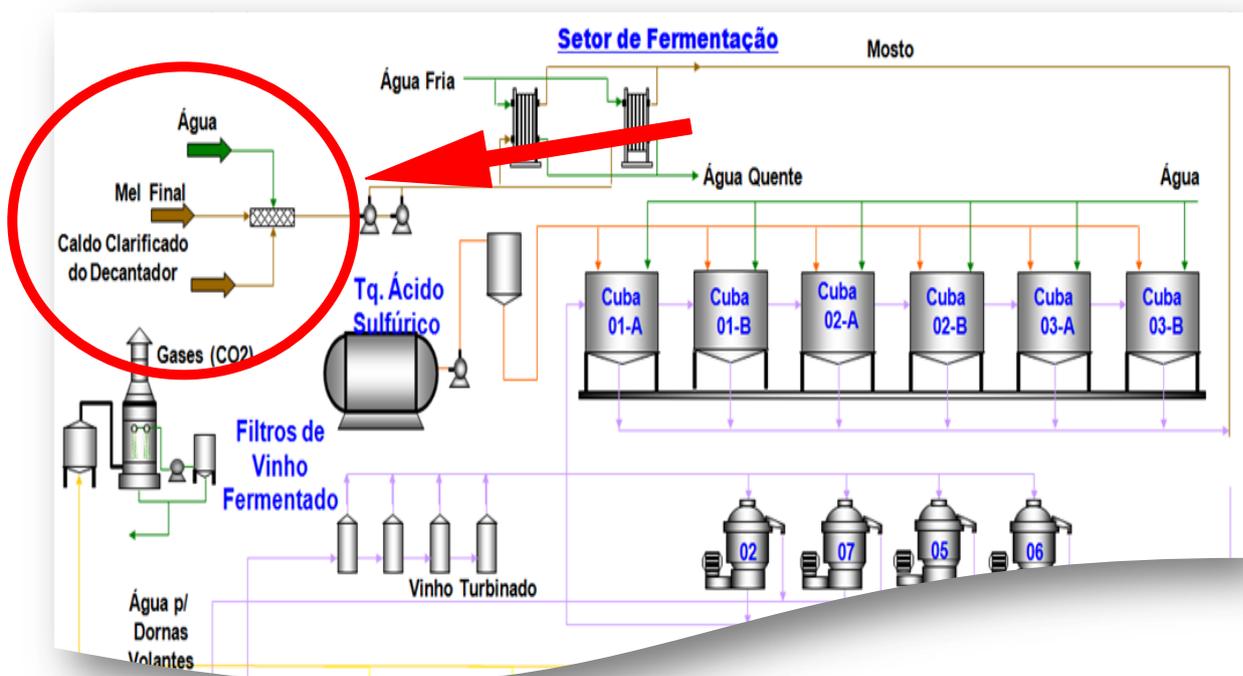
Para que isso seja possível, nos próximos itens, decorre-se por uma série de etapas, até que a disposição do modelo seja alcançada.

3.3 Definição do ponto do processo

Nas diversas sequências de processos, que devem ocorrer para que o etanol seja devidamente fabricado, um dos principais e mais importantes pontos, Figura 20, é a mistura dos componentes principais para compor o mosto.

O mosto, é constituído por água, mel e caldo; ou seja, é uma solução açucarada que fora pré determinado um índice Brix ($^{\circ}\text{Bx}$), que o mosto deverá conter .

Figura 20 – Definição do ponto de processo.



Em indústrias de fabricação de álcool, constantemente são utilizados dois termos, Pol e Brix.

Em seu *web site*, UDOP B (2014) descreve que Pol, implica basicamente na porcentagem em massa de sacarose de uma solução açucarada. E o índice Brix ($^{\circ}\text{Bx}$), definido em porcentagem, por sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose. Ambos medem a pureza do caldo e, buscam determinar o teor de sacarose da cana-de-açúcar.

Desta forma, determinação do $^{\circ}\text{Bx}$ (sólidos dissolúveis) do mosto, é de extrema importância na produção do etanol. Por meio dele, consegue-se determinar, toda uma perfeita condição no mosto para a levedura.

Contudo, para que possa-se determinar um índice brix para o trabalho na fabricação do etanol, especificamente no mosto, deve-se prover a ideal vazão, tanto do mosto quanto dos seus componentes, para assim satisfazer as condições pré determinadas do brix.

3.4 Definição do problema

Na empresa estudada, não existe um tanque para armazenagem do mosto, ou seja, ele é misturado e enviado as dornas para completa-la ou preenche-la (Figura 21), onde iniciará o processo de fermentação.

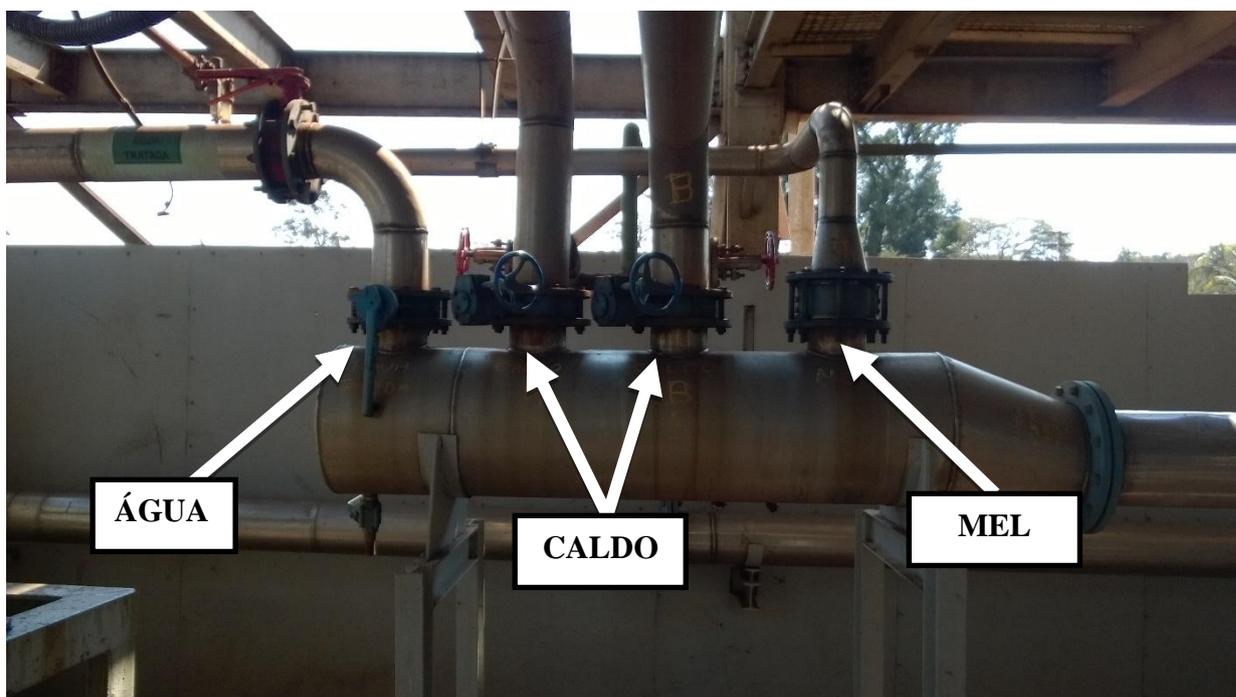
Figura 21 – Ponto de mistura do mosto



Fonte: Usina São Luiz S/A.

Visto isso, um problema para o supervisor de produção da empresa, refere-se ao controle das vazões e, conseqüentemente as oscilações do índice °Bx, que acabam por comprometer eventuais tanques de produção de etanol (Figura 22).

Figura 22 – Controle de vazões



Fonte: Usina São Luiz S/A

Durante a pesquisa de campo, observou-se alguns comportamentos característicos dessas oscilações de vazão e °Bx, no setor de fermentação.

Presenciou-se dois extremos:

- a) Quando o mosto estava muito denso, atrasava consideravelmente o processo de fermentação, o que fazia a levedura aumentar de quantidade;
- b) E quando mosto estava muito “ralo”, aumentava significativamente a quantidade de água e espuma no processo.

Evidenciou-se assim, que um controle otimizado de vazões iniciais dos elementos que compõem o mosto, com a determinação de um índice °Bx ideal no processo, seria viável nesse ponto da fabricação do etanol.

E o controle essas vazões iniciais e índices, implicaria em um controle também da vazão final do mosto.

3.5 O modelo

Com as informações obtidas versus o que deseja-se alcançar, o trabalho visa agora determinar a vazão inicial otimizada dos elementos, para que o controle da vazão final do mosto seja alcançada, sem deixar de respeitar as diretrizes pré estabelecidas dos elementos.

Sabe-se que as principais diretrizes para fabricação do etanol na empresa, refere-se a determinação de um °Bx ideal no processo de fermentação.

Nesse cenário obtém-se alguns fatores:

1- Para o mosto:

- a) °Bx maior do que a levedura demanda: gera prejuízo de rendimento (atrasa o fermento, “afogando” a fermentação);
- b) °Bx menor do que a levedura demanda: atrapalha o processo de fermentação, aumentando a quantidade de levedura (mais água);
- c) °Bx adequado ideal do processo da fabricação na empresa = 25%.

2- Para componentes do mosto:

- a) °Bx do caldo: 9-12%;
- b) °Bx do mel 80%;
- c) °Bx da água 0%.

Os sólidos dissolúveis (°Bx - Brix), precisam ser conhecidos, controlados e pré-determinados para que um sistema ideal de produção de etanol seja satisfeito. Os valores apresentados, referem-se a uma tabela de soluções açucaradas à 20°C, utilizada na empresa.

Nesse contexto, a vazão a ser determinada para o mosto e cada um dos seus elementos é de alta criticidade e, seu controle e parametrização, se faz de extrema importância para a fluidez da mistura.

Utilizando diretrizes de vazão da massa, e densidade dos elementos do mosto, almeja-se otimizar as vazões iniciais do sistema, para que o mesmo, não tenha tantas oscilações na fabricação do etanol.

Entretanto, para que consiga-se indicar a vazão inicial dos elementos, é necessário determinar um referencial teórico englobando esses termos.

Pesquisas junto a supervisão da empresa, foram feitas e, fixou-se o diagrama de cobenze, mais conhecido como “cruz de cobenze”, para elaboração.

Tudo isso aconteceu, pela implantação de indicadores de °Bx, que estavam descalibrados e/ou em não conformidade com os padrões já adotados pela produção da empresa (Figura 23).

Figura 23 – Indicador não calibrado



Fonte: Usina São Luiz S/A.

Constatado isso, o referencial teórico de nosso modelo consolidou-se das seguintes definições:

1) Leis da diluição

- a) Equação do produto entre o brix e o volume;

$$Brix \times V \tag{7}$$

Onde:

- (i) Brix: sólidos dissolúveis (índice) e;
(ii) V: volume (metros cúbicos).

- b) Equação do produto entre o brix e o volume com inclusão de incógnita;

$$Brix_i V_i = Brix_f V_f \tag{8}$$

Onde:

- (i) Brix_i: é o °Bx inicial (índice);

- (ii) $Brix_f$: é o °Bx final (índice);
- (iii) V_i : é o volume inicial (metros cúbicos) e;
- (iv) V_f : é o volume final (metros cúbicos).

c) Equação de verificação da concentração dos elementos individuais, no mosto;

$$C = \frac{C_i V_i + C_f V_f}{V_i + V_f} \quad (9)$$

Onde:

- (i) C: é a diretriz da fórmula (Quilograma por volume);
- (ii) C_i : é a concentração inicial do elemento (Quilograma);
- (iii) C_f : é a concentração do diluente (Quilograma);
- (iv) V_i : é o volume inicial do mosto (metros cúbicos) e;
- (v) V_f : é o volume do diluente a ser adicionado (metros cúbicos).

d) Equação do diagrama de Cobenze e/ou “Cruz de Cobenze”, para determinação das quantidades de °Bx, está contida na amostra;

$$\begin{array}{ccc}
 A & & m - b = A \\
 & \swarrow & \nearrow \\
 & m & \\
 & \swarrow & \searrow \\
 B & & a - m = B
 \end{array} \quad (10)$$

Onde:

- (i) A: peso do caldo (Quilograma);
- (ii) B: peso do diluente (Quilograma);
- (iii) a: °Bx do caldo (índice);
- (iv) b: °Bx do diluente (índice) e;
- (v) m: °Bx do mosto desejado.

e) Equação de volume de massa x densidade no fluxo;

$$V = \frac{M}{D} \quad (11)$$

Onde:

- (i) V: Volume (metros cúbicos na corrente);
- (ii) M: Massa (Quilograma) e;
- (iii) D: Densidade.

f) Equação da vazão mássica ou fluxo de massa.

$$Qm = V \cdot dt \quad (12)$$

Onde:

- (i) Qm: Fluxo de Massa (metros cúbicos por unidade de tempo);
- (ii) V: Volume (metros cúbicos na corrente);
- (iii) d: Densidade e;
- (iv) t: Tempo.

Após esses procedimentos e, com análises dos modelos apresentados, conseguiu-se propor o seguinte modelo de maximização da vazão do mosto no processo, por meio do controle das vazões iniciais:

2) Função objetivo (Maximizar a vazão inicial do mosto no sistema):

$$\text{Max } V = V_{ic} + V_{im} + V_{ia}$$

3) Restrições:

$$dc \cdot cx \leq vc$$

$$dm \cdot my \leq vm$$

$$da \cdot az \leq va$$

$$V_{ic} + V_{im} + V_{ia} \leq V$$

Onde:

- (i) V: vazão final do mosto;
- (ii) V_{ic} : vazão inicial do caldo;
- (iii) V_{im} : vazão inicial do mel;
- (iv) V_{ia} : vazão inicial da água;
- (v) dc: densidade do caldo (tabela utilizada na empresa);
- (vi) dm: densidade do mel (tabela utilizada na empresa);
- (vii) da: densidade da água (tabela utilizada na empresa);
- (viii) cx: vazão máxima do caldo (característica físicoquímica do elemento);
- (ix) my: vazão máxima do mel (característica físicoquímica do elemento);
- (x) az: vazão máxima da água (característica físicoquímica do elemento);
- (xi) vc: limite do fluxo de massa do caldo (capacidade das instalações);
- (xii) vm: limite do fluxo massa do mel (capacidade das instalações) e;

(xiii) va: limite do fluxo massa de água (capacidade das instalações).

3.6 Considerações finais

Nesse capítulo, abordou-se o ambiente, e o contexto produtivo no qual a Usina São Luiz S/A encontra-se.

O estudo se iniciou, desde a apresentação da empresa, até o direcionamento do objetivo específico do trabalho, um estudo de otimização.

Com esses pontos definidos, sustentou-se o modelo apresentado, e principalmente, respeitou as condições colocadas por Colin (2013, Prefácio VII), sobre as características que devem constar em todas as técnicas de otimização (em ordem de importância): “uso de métodos matemáticos para resolver problemas, desejo constante por otimização e orientações a aplicações”.

Ambicionando um teste prático, com uma simulação real no ambiente produtivo e, uma possibilidade de implantação do modelo, o próximo capítulo apresenta uma análise efetiva no processo de fabricação do etanol na empresa, estreitando assim, a relação entre a PO, e situações do mundo real.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE

Esse capítulo, demonstra uma análise geral dos resultados obtidos com a solução do modelo proposto, verificando o impactos dos parâmetros levantados por meio da pesquisa exploratória realizada na empresa.

No entanto, a base fixada para realização dessa análise, foi inicialmente uma simulação real do processo produtivo, uma comparação e validação dos resultados obtidos e, um teste de implementação, proposto à supervisão de produção da empresa.

Desta forma e iniciando os procedimentos para a análise, deseja-se então verificar, com uma vazão final do mosto à 120 m³/h, qual será a vazão inicial de cada elemento:

Possui-se os seguintes dados de fabricação iniciais, utilizado pela empresa, via uma tabela das soluções açucaradas à 20° C, Tabela 2, utilizada na empresa:

Tabela 2 – Informações de fabricação.

	<i>°Bx</i>	<i>Vazão</i>	<i>Densidade Massa</i>
Caldo	10	81	1,04003
Mel	82	26,8	1,42810
Água	1*	10**	1,00390***

Fonte: Usina São Luiz S/A.

(*) *Valores para não nulidade do elemento.*

(**) *Valor estimado vazão da água.*

(***) *Valor considerado com impurezas, provenientes de tubulações e de minerais.*

Com o auxílio da Equações 11 e 12, na Tabela 3, foi possível determinar o limite do fluxo da massa máximo que cada elemento alcança no sistema:

$$V = \frac{M}{D} \quad (11)$$

$$Qm = V \cdot dt \quad (12)$$

Tabela 3 – Fluxo de massa no sistema.

	<i>Fluxo de Massa</i>
Caldo	84,2
Mel	38,3
Água	10

Fonte: o autor.

4.1 Solução do modelo

Nesta etapa, com as variáveis dispostas e com auxílio de ferramentas computacionais, consegue-se executar uma simulação do modelo.

No entanto, primeiro deve-se transportar e adaptar o modelo inicial, para o simulador escolhido, contendo Função Objetivo (Figura 24), Restrições (Figura, 25) e (Figura 26) e obviamente os resultados obtidos (Figura 27).

Figura 24 – Função objetivo - proposta.

$$\text{Max } V = V_{ic} + V_{im} + V_{ia}$$

Fonte: o autor.

Figura 25 – Restrições de vazão máxima dos elementos do mosto.

Caldo (cx)	
Mel (my)	
Água (az)	
Mosto	

Fonte: o autor.

Figura 26 – Restrições II – densidade dos elementos.

Caldo (dc)	
Mel (dm)	
Água (da)	

Fonte: o autor.

Figura 27 – Resultados.

Vazões Iniciais	Caldo (Vicx)	
	Mel (Vimy)	
	Água (Viaz)	
Vazão Final do Mosto	Mosto (V)	

Fonte: o autor.

4.2 Simulação

Agora a interação do modelo é informatizada e, adequação das diretrizes uma vez compreendidas, geram uma usabilidade do programa obtendo resposta muito mais rápidas (Figura 28). Para tanto utilizou-se o Microsoft Excel, com auxílio do suplemento Solver.

Segundo Microsoft (2014, *web site*), o Solver compõe um “conjunto de programas”, chamado “ferramentas de análise hipotética”; onde pode-se “localizar um valor ideal para uma fórmula”. E ainda dispõe sobre a utilização do complemento, em “determinar máximos e mínimos” que uma célula projeta.

Figura 28 – Inclusão de valores.

FUNÇÃO OBJETIVO	
Max V = Vic + Vim + Via	
RESTRIÇÕES I - VAZÃO MÁXIMA NO SISTEMA	
Caldo (cx)	84,2
Mel (my)	38,3
Água (az)	10
Mosto	120
RESTRIÇÕES II - DENSIDADE DOS ELEMENTOS	
Caldo (dc)	1,04
Mel (dm)	1,526
Água (da)	1
* Densidade medida em laboratório	
RESULTADOS - VAZÕES INICIAIS E DO MOSTOS FINAL OTIMIZADAS	
Vazões Iniciais	
Caldo (Vicx)	80,96159846
Mel (Vimy)	25,0982962
Água (Viaz)	10
Vazão Final do Mosto	
Mosto (V)	116,0598347

Fonte: o autor.

Figura 29 – Resultados finais.

Vazões Iniciais

Caldo (Vicx)	80,96153846
Mel (Vimy)	25,0982962
Água (Viaz)	10

Vazão Final do Mosto

Mosto (V)	116,0598347
------------------	--------------------

Fonte: o autor.

Com os resultados obtidos, gerou-se algumas colocações iniciais:

- As densidades individuais dos componentes, são conhecidas via índice Brix de cada elemento; fornecidos por meio da tabela de “Densidade das Soluções Açúcaradas à 20°C”, utilizada pela empresa;
- Conseqüentemente, a determinação do fluxo de massa que cada elemento atingia no sistema, foi obtido por meio do referencial teórico levantando;
- A simulação do modelo, por um software ou suplemento, deve ser utilizada, para que a usabilidade do modelo seja suportada.

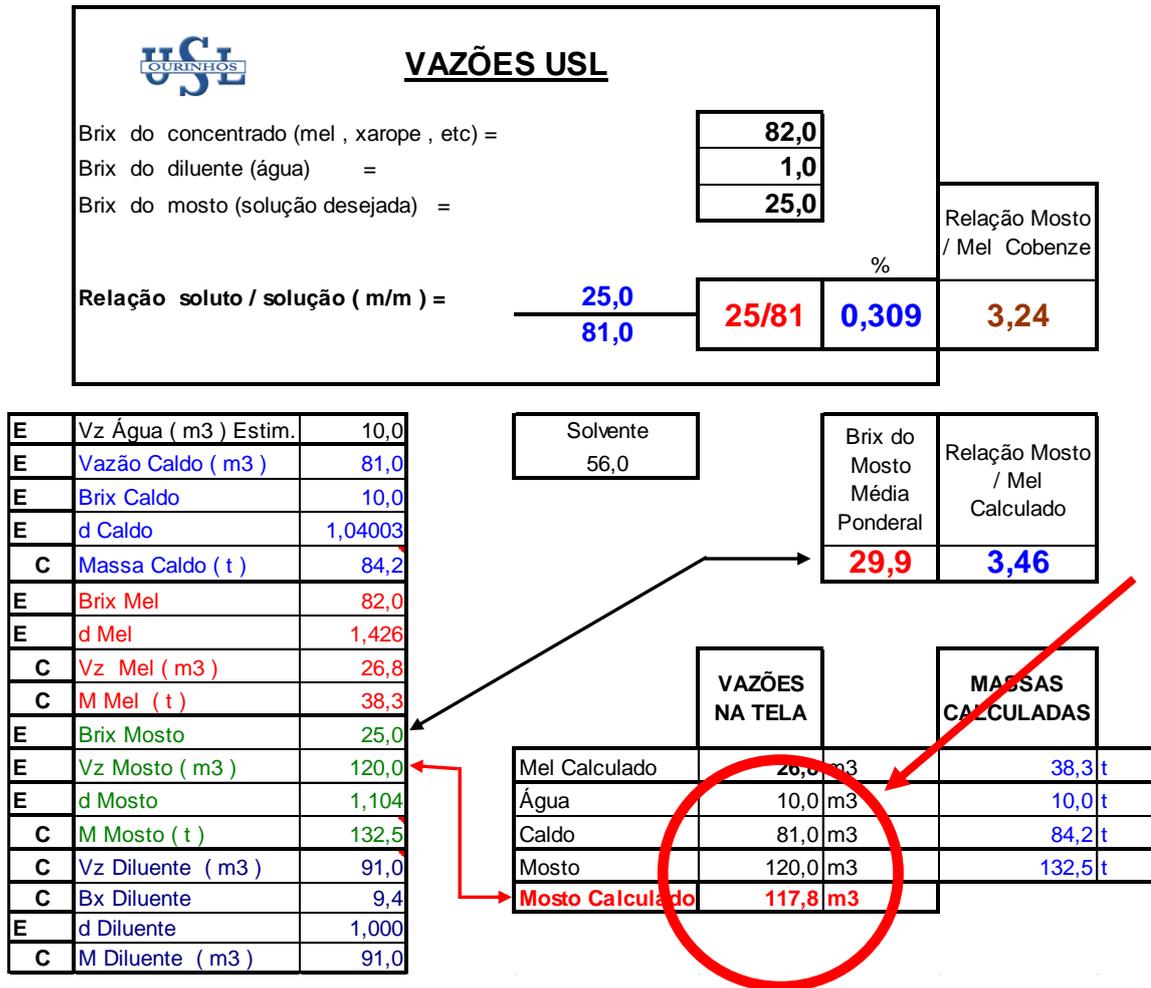
4.3 Validação e comparação

Após a pesquisa de informações, coleta de dados, aplicação e simulação, decidiu-se então, comparar os resultados obtidos, com o utilizado na empresa, com o propósito de otimizar com eficácia e eficiência, esse ponto do processo.

Desta forma, a validação do modelo implica em uma comparação, com os padrões já efetivados pela empresa.

Sendo assim, buscou-se os dados de fabricação das vazões na Usina São Luiz S/A para verificação na Figura 30.

Figura 30 – Controle de vazões da empresa.



Fonte: Usina São Luiz S/A.

Analisando toda a complexidade de informações, no qual o software utilizado pela empresa dispõe e, após comparação de todos os dados, observou-se:

- Uma diferença de vazão de 1,002 m³/h, entre o modelo e o software da empresa;
- Os procedimentos de fabricação, mesmo com uma vazão menor, teve ganhos reais de rendimento;
- Existiu um boa adaptação da levedura à nova vazão e ao índice Brix pré disposto;
- Criou-se um controle efetivo e pré determinado criado para o processo;
- Os problemas de mosto versus processo, foram solucionados, e;
- Trabalhos futuros, seriam muito úteis e necessários, não só na empresa, mas no setor em geral, uma vez que o sucesso propiciado pelo modelo em apenas um ponto do processo foi real, e a ampliação de estudos seria muito benéficas para os gestores.

4.4 Implantação

Mesclando fórmulas e dados já utilizados, em colaboração de seu método de validação, verificou-se o a pequena diferença na folha de vazões da empresa, em relação ao modelo.

Contudo, o modelo disposto, tem como uma de suas características principais, o respeito às características fisioquímicas de cada componente na solução problema.

Desta forma, a alteração de vazão do mosto apresentada, demonstrou de forma ótima, conforme questionário anexo e assinado pelo Supervisor da Empresa, que o modelo foi eficaz, eficiente e, que as alterações devem ser estudadas para que o sistema trabalhe de uma otimizada.

4.5 Considerações finais

Reporto-me a menção de McCloskey; Trefethen (1956), que decorrem sobre a Pesquisa Operacional; dizendo que a pesquisa não consiste puramente em uma simples busca estatística de correlações, devendo assim, considerar a PO como a Pesquisa ao “Nível” Operacional.

As palavras acima, traduzem a intenção desse capítulo, visto que após feito um estudo do processo e das técnicas apresentadas, moldou-se um modelo, e ainda, simulou-se o mesmo, analisando-o em um “nível” operacional.

Desta forma, encerra-se assim, o último ciclo no qual o projeto apresentado transcreveu-se.

CONCLUSÃO

Com uma característica muito própria de produção, o Brasil se destaca no setor sucroenergético, por possuir uma alta quantidade de cana processada, uma considerável diversidade de subprodutos, e uma atividade agrícola interligada à industrial.

Nesse setor entretanto, embora exista uma participação ativa na matriz econômica do país, os custos de produção são bastante altos (NOVA CANA A, 2014).

A importância do segmento no país é evidente, e o investimento em estudos torna-se fundamental, para que se alcance uma maior estabilidade nas relações comerciais, tanto internas, quanto externas (USP, 2009).

Este trabalho, prevê exatamente esse ambiente, onde objetivando otimizar um processo de produção local, contextualizou-se de maneira relativamente simples, melhorias diretas no processo de fabricação em uma usina de açúcar e álcool.

Mediante um levantamento descritivo, o trabalho engloba uma revisão geral dos procedimentos fabris do etanol, assim como, um apanhado global que a Pesquisa Operacional oferece, procurando sempre estreitar ao máximo, as correlações teóricas às práticas.

Feito isso, definiu-se a necessidade da colaboração exploratória, para que a proposta de um estudo de otimização fosse realizada. Com o conhecimento do processo reunido, de técnicas e dos métodos; obteve-se bases para a comprovação da efetividade do estudo proposto, e foi-se à campo buscar um problema real para uma solução otimizada.

Na empresa estudada, optou-se pelo setor da destilaria para a realização do estudo, quando um ponto em especial chamou a atenção, as oscilações do mosto no setor da fermentação.

Voltando a fase descritiva, a análise dos estudos de caso realizados no setor, foram de extrema importância, para que se obtivesse diretrizes em nossa pesquisa. Com essas informações levantou-se toda a situação problema e a partir dela, especificou-se as exatas variações que aconteciam na produção.

Nesta fase entretanto, novamente recorreu-se ao nível descritivo, provendo a elaboração de um modelo matemático que abordasse, as questões dos índices de vazão no processo.

Após essas etapas, restava ainda uma simulação no mundo real do modelo, desta forma, fez-se uma simulação e uma validação de modelagem.

Com o sucesso da simulação, abordou-se uma proposta para implementação, no qual a verificação na prática aconteceu, inclusive com melhorias efetivas no processo de fabricação do etanol na empresa.

Inicialmente, o modelo almejava estabelecer índices ótimos nas vazões iniciais do processo do mosto, contudo, uma surpresa ocorreu quando verificou-se, que o modelo não apenas supria a indicação de valores otimizados nas vazões iniciais em termos de capacidade, como também, respeitava as características físico-químicas dos elementos que compunham o mosto.

Em entrevista realizada com o Supervisor de Produção da Usina São Luiz S/A, obteve-se a avaliação profissional deste modelo; quando o profissional, afirma que a proposta englobou, parametrizou e otimizou os processos realizados na empresa.

Esse estudo de otimização, fixou-se nas bases abordadas por Colin (2013, Prefácio VII) sobre a modelagem: “o uso de métodos matemáticos para resolver problemas, desejo constante por otimização e orientações a aplicações”, para sua elaboração.

Na empresa, uma nova visão de otimização de processos foi apresentada, desmistificando análises práticas versus teoria, com provas reais da otimização demonstrada em campo.

Dentre outras, o modelo foi principalmente elaborado idealizando uma situação real, facilitando planejamento, previsões, tendo como objetivo final a verdade (CAIXETA-FILHO, 2014).

Trabalhos futuros

Trabalhos futuros no setor, e nas ciências compreendidas pela Pesquisa Operacional, seriam interessantíssimos, uma vez que apresentariam melhorias em pontos específicos ou generalizados.

Desta forma foi-se além e, almejando futuras possibilidades de estudo e projetos de pesquisa, incorporando esse trabalho, propôs-se:

- Avaliar a implementação de técnicas de otimização em outros setores da empresa.
- Implementar técnicas de otimização, envolvendo toda a disponibilidade logística da empresa, que tem origem própria.
- Otimizar processos, mensurando não só os procedimentos, mas englobando todo o custo da produção, para um efetivo controle econômico geral.

REFERÊNCIAS

- BELTRÃO, Sebastião de Castro; ANDRADE, Samara Alvachian; **Engenharia e Tecnologia Açucareira**. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, 2006.
- CAIXETA-FILHO, José Vicente. **Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2014.
- CAMILIOS NETO, Doumit *et al.* Otimização da produção de etanol por *Zymomonas mobilis* na fermentação do melaço de cana-de-açúcar. In: SEMINA: CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICA, 1, 2005. **Artigo**. Londrina: Print ISSN: 16765451, 2005. v. 26, p. 17 - 22.
- COLIN, Emerson Carlos. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- COPERSUCAR. **Perfil**. 2014. Elaborado por: Copersucar. Disponível em: <<http://www.copersucar.com.br/perfil.html>>. Acesso em: 03 nov. 2014.
- DALBEM, A. J; KOIKE, G.H.A; PASSARINI, L.C. Modelagem e simulação para o processo industrial de fabricação de açúcar e álcool. **Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia**. Volume 3, Número 1 - janeiro a junho de 2006.
- DAVENPORT, Thomas H. **Reengenharia de processos**. Tradução de Watensir Dutra. Rio de Janeiro: Campus, 1994.
- ESALQ/USP A, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Indicador Mensal Etanol Anidro CEPEA/ESALQ Combustível - Estado de São Paulo**. 2014. Departamento de Economia, Administração e Sociologia - DEAS, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ, Universidade de São Paulo - USP. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/etanol/?page=407>>. Acesso em: 12 ago. 2014.
- ESALQ/USP B, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Indicador Mensal Etanol Hidratado CEPEA/ESALQ Combustível - Estado de São Paulo**. 2014. Departamento de Economia, Administração e Sociologia - DEAS, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ, Universidade de São Paulo - USP. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/etanol/?page=407>>. Acesso em: 12 ago. 2014.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GOMES, F.P.; LIMA, U.A. **A cana-de-açúcar no mundo**. In: Cultura e Adubação da Cana-de-açúcar. Capítulo 1, Instituto Brasileiro de Potassa Experimentações e Pesquisas, 1964, São Paulo. p. 11-26. 1964.

LUCCHESI, A.A. **Cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. In: CASTRO, P.R.C., KLUGE, R.A. (Coords.). Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira. Cosmópolis-SP: Stoller do Brasil, 2001, p.13-45.

MAPA. **Cana-de-Açúcar**. 2014. Elaborado por: Ministério da Agricultura. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

MARQUES; P.V. (Coord.) **Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2009. 194 p. Relatório apresentado a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA.

McCLOSKEY, Joseph F.; TREFETHEN, Florence N. **Pesquisa Operacional como instrumento de gerência**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1956. Tradução de: Léo Magarinos de Souza Leão.

MICROSOFT. **Sobre o Solver**. 2014. Elaborado por: Suporte Microsoft. Disponível em: <<http://office.microsoft.com/pt-br/excel-help/sobre-o-solver-HP005198368.aspx>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

MITROFF, I. I.; BETZ, F.; PONDY, L. R.; SAGASTI, F. On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. **Artigo**. Interfaces, v. 4, n. 3, p. 46 – 58, 1974.

NOVA CANA, A. **Setor sucroenergético brasileiro supera PIB de mais de 100 países**. 2014. Elaborado por: Revista Nova Cana. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/marketing/sucroenergetico-supera-pib-100-paises-290514>>. Acesso em: 03 nov. 2014.

NOVA CANA, B. **As Usina de Açúcar e Etanol do Brasil**. 2014. Elaborado por: Revista Nova Cana. Disponível em: <<http://www.novacana.com/usinas-brasil>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

PAIVA, Rafael Piatti Oititica de; MORABITO, Reinaldo. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. In *Gestão & Produção*. **Artigo**. São Carlos, v. 14, n. 1, p.25-41, 2007. Acesso em: 21 abr. 2014.

PENIDO FILHO, Paulo. **O álcool combustível: obtenção e aplicação nos motores**. São Paulo: Nobel, 1980.

RAMOS, Rômulo Pimentel. **Modelo matemático para custo e energia na produção de açúcar e álcool**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

SANTOS, Ricardo Cardoso dos. **Produção de Etanol Anidro: Aspectos Técnico-Operacionais e Econômicos para Exportação**. 2010. 50 f. Monografia (Tecnólogo) – Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza Faculdade de Tecnologia, Araçatuba, 2010.

SCANDIFFIO, Mirna Ivone Gaya. **Análise Prospectiva do Álcool Combustível no Brasil - Cenários 2004-2024**. 2005. 182 f. Tese (Doutorado) - Unicamp, São Paulo, 2005.

SILVA, Aneirson Francisco da; MARINS, Fernando Augusto Silva; MONTEVECHI, José Arnaldo Barra. Aplicação de programação por metas binária - mista em uma empresa do setor sucroenergético. In *Gestão & Produção*. **Artigo**. São Carlos, 2013. v. 20, p. 321 - 336.

SILVA, Bráulio Wilker. **Pesquisa Operacional: Visão Geral**. 2011. Elaborado por: BWS Consultoria. Disponível em: <<http://www.bwsconsultoria.com/2011/04/pesquisa-operacional-visao-geral.html>>. Acesso em: 11 ago. 2014.

UDOP A. **Fluxogramas da Produção de Açúcar e Álcool**. 2012. Elaborado por CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=29960#nc>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

UDOP B. **O que é Pol e Brix**. 2014. Autor Desconhecido. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=26085>>. Acesso em: 20 out. 2014.

USP. **Vendas do setor sucroenergético representam 1,5% do PIB**. 2009. Elaborado por Rosemeire Soares Talamone, do Serviço de Comunicação Social da Coordenadoria do Campus de Ribeirão Preto. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=11730>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

USL A. **História**. 2009. Elaborado por: Usina São Luiz S/A. Disponível em: <<http://www.usinasaoluiz.com.br/>>. Acesso em: 26 ago. 2014.

USL B. **Etanol**. 2009. Elaborado por: Usina São Luiz S/A. Disponível em: <<http://www.usinasaoluiz.com.br/>>. Acesso em: 26 ago. 2014.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

Nome da Empresa: USINA SÃO LUIZ S/A.

Nome do entrevistado/Cargo: Marco Jorge Zimak – Supervisor Laboratório e Produção Indl.

Data: 28/08/2014

1- Há quanto tempo o Sr. trabalha na empresa?

11 anos

2- Em relação a qualidade, os meios de controle utilizados na empresa são satisfatórios para garantir um produto final adequado?

São satisfatórios, as metodologias obedecem as normas da ABNT, ANP entre outras para produção do etanol.

3- O Sr. conhece as abordagens que Pesquisa Operacional, oferece?

Sim, sempre ache bastante interessante sua aplicabilidade quando estudei na graduação e MBA.

4- Já aplicou efetivamente o conteúdo de PO no processo da empresa?

Parcialmente, de uma forma mais analítica. Estou trabalhando num projeto em paralelo a esse.

5- O comportamento do modelo, juntamente com as técnicas demonstradas nesse trabalho, ficou em conformidade com os processos adotados pela empresa?

Sim, inclusive a variação entre o modelo verificado e os parâmetros adotados na produção, são perfeitamente aceitáveis.

6- Em um sistema que envolva vazão na produção, esse modelo se mostra eficaz?

Quando realizamos o teste com vazão continua sim, contudo, se tivemos vazões intermitentes, deve-se realizar ajustes nos parâmetros desse modelo.

7- Como esse modelo se comportou nos processos de decisão da produção?

Não só eficaz, como eficiente, conseguimos controlar com ele, diversos parâmetros de maneira muito ágil.

8- Gerencialmente, trabalhos como este, poderiam auxiliar a produção da empresa? Como?

Poderiam, agindo de forma específica e pontuando os diversos problemas e situações que verificamos na produção.

Ourinhos/SP, 28 de Agosto de 2014

Marco Jorge Zimak – Sup. Lab. e Produção Indl.

- Autorizo a divulgação das informações apresentadas neste trabalho .

ANEXO A – FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL.

Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=29960#nc>>

