

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PAULO CÉSAR MORAIS

ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE NA MOAGEM DE CANA PARA A
FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

FORMIGA – MG
2017

PAULO CÉSAR MORAIS

ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE NA MOAGEM DE CANA PARA A
FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG,
como requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a M.^a Christiane Pereira Rocha
Sousa

FORMIGA – MG

2017

M827 Morais, Paulo César.

Estudo das variáveis de controle na moagem de cana para a fabricação de açúcar / Paulo César Morais – 2017.

84 f.

Orientadora: Christiane Pereira Rocha Sousa.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)-Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2017.

1. Açúcar. 2. Controle de processos. 3. Controle estatístico do processo.
I. Título.

CDD 660.2815

Paulo César Moraes

ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE NA MOAGEM DE CANA NO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química do UNIFOR-
MG, como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Ms. Christiane Pereira Rocha Sousa

Orientadora



Prof. Dr. Alex Magalhães de Almeida

UNIFOR-MG



Prof^a. Ms. Tânia Aparecida de Oliveira Fonseca

UNIFOR-MG

Formiga, 30 de outubro de 2017.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Christiane, pela paciência, dedicação e os conhecimentos transferidos durante a elaboração deste trabalho. O meu muito obrigado será pouco diante de muita gratidão.

À professora Rosiene, se mostrando sempre presente nos momentos de dúvidas, muito obrigado!

Aos profissionais da Biosev S.A. unidade de Lagoa da Prata, principalmente Aniely e Nelson, pela grande colaboração para a realização deste trabalho.

Aos meus mestres meu muito obrigado, não somente por me ensinar as práticas e teorias, mas por fundamentar o meu ideal de ética e moral.

Às pessoas que colaboraram diretamente ou indiretamente para realização deste trabalho, muito obrigado!

RESUMO

A busca por alimento, fez com que o homem extraísse da natureza o carboidrato mais consumido dos últimos tempos, o açúcar, e tal técnica foi sendo aprimorada desde os primórdios. Conhecimentos sobre mercado, propriedades do açúcar, e do processo são fundamentais para a solução de problemas e desenvolvimento do mesmo. Nos últimos anos foi perceptível o avanço das indústrias açucareiras em sempre produzir mais e perder o mínimo de matéria-prima possível, tal preocupação, foi responsável por alavancar o processo dessas indústrias, tornando-as mais automatizadas, assim, se fazendo necessário, estudos sobre as variáveis de processo, controle estatístico e o controle químico, a fim de contribuir para o maior controle do processo, cumprindo com os parâmetros de qualidade necessários. No presente trabalho foram realizadas pesquisas bibliográficas a fim de catalogar as variáveis de processo presentes na moagem de cana-de-açúcar, os possíveis valores de controle de acordo com pesquisas em campo, a importância do controle de processos (CEP) na moagem, e os principais controles químicos feitos nessa importante etapa do processo de produção de açúcar.

Palavras-chave: Açúcar. Controle de processos. Controle estatístico do processo.

ABSTRACT

The search for food has caused man to extract from nature the most consumed carbohydrate of recent times, sugar, and this technique has been improved since the beginning. Knowledge about the market, sugar properties, and process are key to problem solving and development. In the last years, the progress of the sugar industry has been evident in always producing more and losing the minimum possible raw material. This concern was responsible for leveraging the process of these industries, making them more automated. The process variables, statistical control and chemical control, in order to contribute to the greater control of the process, complying with the necessary quality parameters. In the present work, bibliographical research was carried out to catalog the process variables present in sugarcane milling, the possible control values according to field research, the importance of process control (CEP) in milling, and the main chemical controls made in this important stage of the sugar production process.

Keywords: Sugar. Process control. Statistical process control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Estruturas moleculares da glicose e frutose.....	17
Figura 2 -	Estrutura molecular da sacarose.....	18
Figura 3 -	Estrutura molecular da celulose.....	19
Gráfico 1 -	Produção e Consumo mundial de açúcar.....	24
Gráfico 2 -	Principais Produtores de Açúcar 2013/2014.....	24
Gráfico 3 -	Exportações de Açúcar para os principais países e regiões.....	25
Figura 4 -	Destino do açúcar ao mercado externo e doméstico.....	26
Figura 5 -	Mapeamento do cultivo de cana-de-açúcar.....	28
Figura 6 -	Estrutura da cana-de-açúcar.....	28
Figura 7 -	Diagrama de blocos da produção do açúcar.....	31
Figura 8 -	Fluxograma de processo do açúcar.....	33
Figura 9 -	Modelo representativo de um terno de moenda.....	35
Figura 10-	Esquema da extração do caldo por moendas, e o modo de embebição.....	36
Figura 11-	Esquema de embebição e filtração do caldo.....	37
Figura 12 -	Esquema do processo de tratamento de caldo.....	40
Figura 13 -	Esquema de um decantador.....	41
Figura 14 -	Esquema ilustrativo de um filtro à vácuo.....	42
Figura 15 -	Esquema de um evaporador do tipo Robert.....	44
Figura 16 -	Esquema dos evaporadores tipo Roberts, em múltiplo efeito, composto do pré-evaporador.....	45
Figura 17 -	Esquema do conjunto dos cozedores de massas A, B e C.....	48
Figura 18 -	Esquema do balanço de massa na extração do caldo de cana.....	51
Figura 19 -	Esquema do balanço de ART na extração do caldo de cana.....	53
Figura 20 -	Elementos e termos em um controle de processos.....	56
Figura 21 -	Sistema de controle em malha aberta.....	57
Figura 22-	Sistema de controle em malha fechada.....	58
Figura 23 -	Diagrama P&I da moagem de cana-de-açúcar.....	60
Figura 24 -	Modelo de um gráfico de controle.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição da cana-de-açúcar.....	29
Tabela 2 -	Descrição da simbologia do diagrama P&I na moagem de cana-de-açúcar.....	61
Tabela 3 -	Interpretações para os valores de <i>Cpk</i>	74
Tabela 4 -	Esboço das variáveis controladas pelo CEP.....	75

LISTA DE SIGLAS

EQ.	Equação
EQ. Q.	Equação Química

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	INDÚSTRIA AÇUCAREIRA.....	16
4.1	Estrutura e Propriedades do açúcar.....	17
4.1.1	Monossacarídeos.....	17
4.1.2	Oligossacarídeos.....	18
4.1.3	Polissacarídeos.....	19
4.2	Tipos de açúcar.....	19
4.2.1	Açúcar branco.....	20
4.2.2	Açúcar cristal.....	21
4.2.3	Açúcar demerara.....	21
4.2.4	Açúcar mascavo.....	22
4.2.5	Açúcar refinado.....	22
4.2.6	Açúcar <i>very high polarization</i> (VHP).....	22
4.3	Mercado do açúcar.....	23
5	PRODUÇÃO DO AÇÚCAR DE CANA.....	27
5.1	A cana-de-açúcar.....	27
5.2	Estágio de maturação e colheita.....	30
5.3	Processo de produção do açúcar de cana.....	31
5.3.1	Lavagem da cana-de-açúcar.....	34
5.3.2	Extração da sacarose ou moagem.....	34
5.3.2.1	Peneiramento do caldo.....	36
5.3.2.2	Bagaço.....	37
5.3.3	Tratamento do caldo.....	37
5.3.3.1	Sulfitação.....	38
5.3.3.2	Calagem.....	39
5.3.3.3	Balão de Flash.....	40
5.3.3.4	Decantação.....	41

5.3.4	Filtragem do lodo.....	41
5.3.5	Evaporação.....	43
5.3.6	Cozimento.....	45
5.3.7	Cristalização.....	46
5.3.7.1	Centrifugação.....	47
5.3.8	Secagem.....	48
5.3.9	Armazenamento.....	49
6	BALANÇO DE MASSA NA EXTRAÇÃO DO CALDO DE CANA.....	50
7	VARIÁVEIS DE CONTROLE	55
7.1	Variáveis de controle na extração do caldo de cana.....	58
7.2	Controle das Variáveis.....	63
7.2.1	Controle na alimentação de cana-de-açúcar.....	63
7.2.2	Velocidade das turbinas das moendas.....	64
7.2.3	Vazão de água da embebição.....	64
7.2.4	Nível da caixa de caldo.....	65
7.2.5	Divisão do caldo entre destilaria e fábrica de açúcar, e controle das vazões.....	66
7.2.6	Limpeza automática.....	66
7.2.7	Comando e intertravamento de motores.....	67
7.2.8	Flutuação do rolo superior dos ternos de moenda.....	67
7.2.9	Temperatura dos equipamentos.....	68
7.2.10	Temperatura da água de embebição.....	68
7.2.11	Temperatura do vapor para as turbinas.....	68
7.2.12	Pressão do vapor para as turbinas.....	69
7.2.13	Pressão de óleo de lubrificação das turbinas e moendas.....	69
7.2.14	Medição de rotação das mesas de alimentação, esteiras e turbinas.....	70
7.2.15	Medição de umidade do bagaço.....	70
8	CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP).....	72
8.1	Gráficos de controle.....	72
8.2	Capacidade do processo.....	73
8.3	O CEP na moagem de cana-de-açúcar.....	74
9	CONTROLE QUÍMICO DA MOAGEM	76

9.1	Caldo primário.....	76
9.2	Caldo misto.....	76
9.3	Bagaço.....	77
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

A vida humana possui uma dieta rica e diversificada comparada aos demais seres vivos, dentre os diversos tipos de alimentos, estão os carboidratos, e nele o açúcar, sendo geralmente o mais consumido pelo homem. Segundo Shreve e Brink (2014), o corpo necessita de uma fonte de energia, e o mesmo consegue fornecer até 13% dessa energia. Devido à importância desse alimento, as indústrias extrativas do açúcar estão se desenvolvendo a todo vapor. O produto é extraído de alguns vegetais, sendo os principais, a cana-de-açúcar, beterraba e o milho.

O mercado sucroalcooleiro tem como produto principal o açúcar, e segundo Lieberg (2014) em 2014, a produção mundial de açúcar chegou a 175 milhões de toneladas. Segundo Hamerski (2009) o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, atrás vem, Índia, Tailândia e Austrália, fornecendo para os outros 60% do comércio mundial.

Segundo Fernandes e Almeida (2011), a indústria sucroalcooleira é conhecida como uma extratora de sacarose, pois, possui o objetivo de extrair da cana-de-açúcar a sacarose, e através do seu processo industrial, “concentrar” essa sacarose formando o açúcar, ou fermentando o caldo, para a produção de álcool.

Durante o aprimoramento da fabricação do açúcar e álcool, de acordo com Machado (2012) existem diversos tipos de açúcar, entre eles, os principais: demerara, mascavo, cristal, refinado, líquido, VHP (*very high polarization*) entre outros. Fernandes e Almeida (2011) cita que na produção de álcool, existem somente dois tipos: o álcool anidro e o álcool hidratado.

Segundo Shreve e Brink (2014), não é possível encontrar na natureza produto orgânico, com concentração de 99,96% igual o açúcar, e ser comercializado de forma tão barata, isso ocorre, devido ao aperfeiçoamento do processo de produção do mesmo, que consegue produzir muito, em pouco tempo, trabalhando na redução de perdas do processo. O profissional da engenharia química possui papel fundamental na indústria sucroalcooleira, pois, no decorrer do processo de produção de açúcar, existem diversas operações unitárias, conversões químicas, balanços de massas, variáveis de processo, e para controlar o processo, uma boa ferramenta estatística.

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica de um possível controle das variáveis do processo de moagem para a produção do açúcar,

apresentar como o controle estatístico pode colaborar nessa etapa, e os parâmetros químicos para manter a moagem dentro da qualidade desejada minimizando as perdas possíveis no processo, além de garantir a qualidade do mesmo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma pesquisa bibliográfica de um possível controle das variáveis de processo na moagem de cana-de-açúcar, para a produção de açúcar.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos destacam-se:

- Apresentar a importância da indústria açucareira, como o mercado financeiro, e também todos os tipos de açúcares.
- Fazer uma revisão na literatura sobre o processo de produção do açúcar, balanço de massa da matéria prima durante a extração do caldo, apresentar as variáveis de controle na moagem, controle estatístico, e os parâmetros químicos de controle na moagem.
- Realizar um estudo bibliográfico e buscar dados em uma usina para apresentar um melhor controle possível das variáveis do processo e os parâmetros químicos analisados na moagem de cana-de-açúcar.

3 JUSTIFICATIVA

A sociedade atualmente possui uma grande preocupação em uma futura escassez de alimentos, logo, as indústrias desse segmento estão aperfeiçoando cada vez mais a forma de produção de alimentos ou as extrações dos mesmos da natureza. É inaceitável no processo industrial que envolva alimentos haver perda de matéria-prima, e na indústria de extração de açúcar não é diferente, há uma grande preocupação em tornar o processo mais eficiente possível, para não haver perda de sacarose, preocupando-se até mesmo com os resíduos gerados, como o bagaço, utilizados na produção de energia.

Para se chegar aos processos eficientes e viáveis, são utilizadas diversas ferramentas, e o mercado da engenharia busca constantemente pela melhor combinação dessas, para atender às necessidades das usinas de açúcar, em vista disso, esse trabalho se justifica pela busca na literatura pela melhor faixa em que as variáveis de controle do processo de moagem devem operar, envolvendo as ferramentas necessárias para uma boa extração, sem perdas durante o processo, e com conformidade com os parâmetros de qualidade.

4 INDÚSTRIA AÇUCAREIRA

O açúcar pode ser extraído de muitos vegetais, porém, os mais conhecidos atualmente são os açúcares extraídos da beterraba, milho e da cana-de-açúcar, talvez pelo fato da enorme abundância, o fácil manejo dos canavieiros, o açúcar provindo da cana-de-açúcar se tornou mais comum (Shreve e Brink, 2014). Não se sabe ao certo de onde a cana-de-açúcar se originou, estudos dizem que é do Pacífico Sul, ou do sul da Índia, posteriormente se espalhando pela Ásia, Oriente Médio, até chegar à África do Norte e à Espanha, desde então o açúcar cristalino foi primeiramente extraído e exportado para a Europa no século XV (COUTEUR E BURRESON, 2003).

Segundo Shreve e Brink (2014), o mercado do açúcar foi de grande importância no século passado entre a Ásia e a Europa, mais tarde a América do Norte, também iniciou a extração do açúcar, desde então a indústria açucareira cresceu constantemente, do aprimoramento do processo, até a qualidade do produto. Moinhos e moendas foram implantados ao método de obtenção do açúcar, a evaporação, adsorção, centrifugação e filtração, sempre foram etapas importantes do processo, que posteriormente seriam denominadas operações unitárias do mesmo.

A indústria açucareira é de grande variabilidade, pois, ela utiliza a cana-de-açúcar de forma em aproveitar todas as suas partes, como do caldo obtêm-se açúcar e álcool, do bagaço, o papel, adubo, ração animal e combustível e até mesmo das folhas, utilizando como cobertura para o próprio solo de cultivo da mesma. Desta forma a indústria da cana-de-açúcar faz parte do segmento de alimentos, não alimentos e energia, gerando mão de obra nos processos agrícolas e industriais, tornando-se uma indústria de grande importância na economia em que está inserida (HAMERSKI, 2009).

É de suma importância na área da química e engenharia química, estudar processos químicos industriais, conhecer o mesmo na forma de um todo e conhecer a estrutura e propriedades das substâncias que estão envolvidas no mesmo, pois, segundo Doce Aroma, Aditivos e Ingredientes [200-], conhecer a molécula do açúcar proveniente da cana de forma minuciosa é fundamental.

4.1 Estrutura e Propriedades do Açúcar

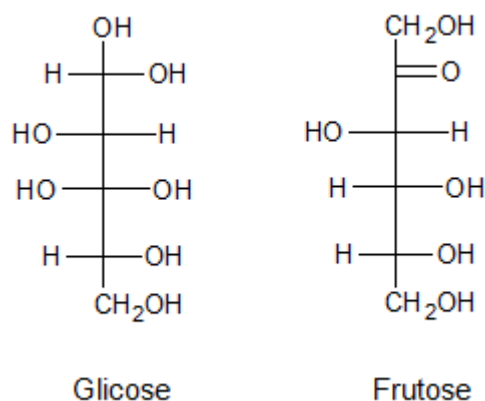
Ainda de acordo com Doce Aroma, Aditivos e Ingredientes [200-], que reconhecer as propriedades físicas, químicas e biológicas ajudam no aperfeiçoamento do processo químico industrial, como sua reatividade a outros compostos, velocidade na formação dos cristais e até mesmo modificar o sabor doce para ser utilizado em produtos alimentícios específicos.

Segundo Francisco Junior (2008) os açúcares, carboidratos, fontes essenciais para a sobrevivência humana, e são responsáveis pelo fornecimento energético dos seres vivos. Já os carboidratos possuem esse nome, devido a hidratos de carbono, fórmula $(CH_2O)_n$ que são presentes nas suas estruturas. Esses compostos podem ser classificados, conforme a quantidade de ligações glicosídicas (combinação de uma hidroxila com outra hidroxila formando água, e as valências livres dos dois grupos se unem, formando uma ligação) que eles possuem, em monossacarídeos, oligossacarídeos e polissacarídeos.

4.1.1 Monossacarídeos

Segundo Vollhardt e Schore (2004), monossacarídeo ou também conhecido como açúcar simples, é uma molécula que contém um grupo aldeído ou cetona junto a pelo menos duas hidroxilas, como representado na FIG. 1. Os exemplos mais comuns de monossacarídeos são a glicose e frutose.

Figura 1 – Estruturas moleculares da glicose e frutose

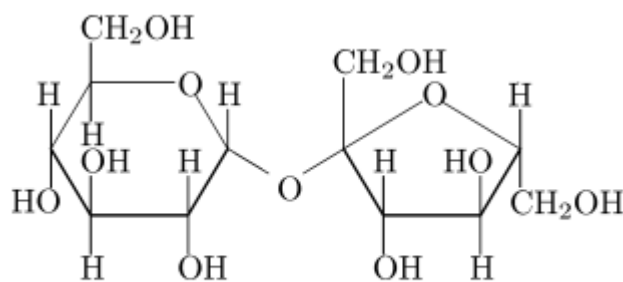


As estruturas dos monossacarídeos são polares, isto faz com que eles sejam cristais em temperatura ambiente e solúveis em água. Esse tipo de carboidrato possui uma propriedade importante, pois, esses compostos são oxidados por íons cúpricos (Cu^{2+}) e férricos (Fe^{3+}), sendo chamados de açúcares redutores (FRANCISCO JUNIOR, 2008).

4.1.2 Oligossacarídeos

Ainda de acordo com Francisco Junior (2008) os oligossacarídeos, são curtas cadeias de monossacarídeos, sendo mais conhecidos os dissacarídeos, que são a junção de dois monossacarídeos, por uma ponte de éter. Entre o grupo de carboidratos dissacarídeos, está a sacarose, (FIG. 2), cuja fórmula molecular é $\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ e massa molecular de aproximadamente 342,297 g/mol.

Figura 2 – Estrutura molecular da sacarose



Sacarose

Fonte: FRANCISCO JUNIOR, 2008, p.2, adaptado MORAIS, P.C.

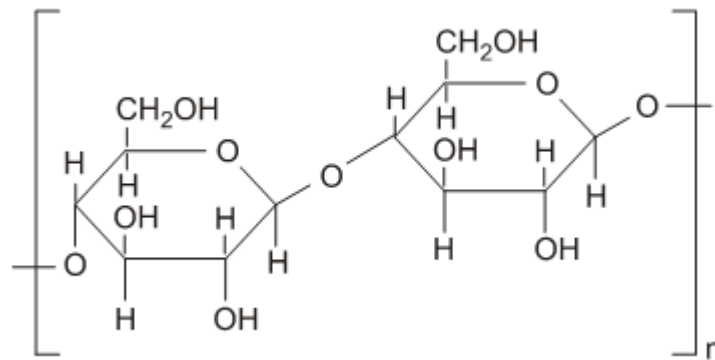
Na forma de cristais sólidos, o açúcar (sacarose) não apresenta particularidades relacionadas ao odor e cor. Teoricamente, se cristaliza na forma de cristais com 15 faces, porém, na prática, são encontrados cristais entre 8 e 10 facetas. O açúcar facilmente encontrado em comércios possui geralmente pureza de 99,8%, sendo o restante em água, minerais e glicose (DOCE AROMA, ADITIVOS E INGREDIENTES [200-]).

O açúcar invertido, comumente comercializado para produtos que não é interessante a cristalização da sacarose, é uma reação de hidrólise da molécula de sacarose, obtendo um mistura de frutose e sacarose. (FRANCISCO JUNIOR, 2008).

4.1.3 Polissacarídeos

Segundo Vollhardt e Schore (2004), os polissacarídeos são carboidratos que possuem a ligação de éter entre um monossacarídeo e um dissacarídeo, formando um trissacarídeo, ocorrendo sucessivas ligações de éter, formam-se então, os polissacarídeos, chamados também de polímero natural. Como exemplos deste tipo de carboidrato, estão a celulose e o amido, e na FIG. 3 está representado a estrutura da celulose.

Figura 3 – Estrutura molecular da celulose



Fonte: VOLLHARDT E SCHORE, 2004, p.934, adaptado MORAIS, P.C.

Segundo a The sugar association (2017), na fabricação de açúcar, existem os açúcares provenientes da beterraba e milho, além do açúcar de cana, o qual origina diversos produtos, desde o simples açúcar cristal branco conhecido do dia-a-dia, até mesmo os cristais de sacarose que ficam com resíduos de melaço gerando outros tipos de açúcar, desta forma, para conhecer o processo industrial é relevante saber os produtos que se originam do mesmo.

4.2 Tipos de açúcar

Segundo Shreve e Brink (2014), em 1747 foi descoberto o açúcar proveniente da beterraba, seu ingresso nos Estados Unidos aconteceu anos mais tarde, porém, o processo de extração do açúcar proveniente da beterraba é considerado mais complexo no âmbito econômico e industrial, e ainda possui maiores taxas de

importações, o que torna o açúcar oriundo da cana, mais atrativo. Os principais produtores de açúcar de beterraba são os países da União Europeia (ROSA, 2005)

No mercado do açúcar, existe também o açúcar proveniente do milho, segundo Manochio (2014), a reação de fotossíntese que ocorre no milho produz o amido e, através de uma reação de hidrólise, a sacarose é formada. Os Estados Unidos é o maior produtor de açúcar de milho.

Embora existam os açúcares de beterraba, milho e cana-de-açúcar, segundo Rosa (2005), o açúcar que possui maior parte do mercado mundial, é o açúcar oriundo da cana, representando 80% da produção mundial.

O processo de fabricação de açúcar visa uma melhor extração do caldo proveniente da matéria prima, neste caso, a cana-de-açúcar, a qual é rica em diversos açúcares, entre eles a sacarose, frutose e glicose. Deste modo, a agroindústria de açúcar é dividida em duas partes, o setor agrícola e o industrial (ALMEIDA, 2009).

O setor industrial, de acordo com Bem Dal, Koike e Passarini (2006), tem como objetivo principal a extração do caldo, preparação e “condensação” do mesmo, resultando em diversos tipos de açúcares conhecidos no mercado, sendo principais os açúcares, branco, açúcar cristal, demerara, mascavo, açúcar refinado granulado, VHP, líquido, entre outros.

4.2.1 Açúcar branco

Segundo Machado (2012), existem dois tipos de açúcares brancos, o com refino, que passa pelos tratamentos utilizando principalmente o enxofre, deixando o produto mais branco. O outro é o açúcar branco sem refino, o qual não passa pelo tratamento e é um produto mais escuro, ambos são para o mercado externo. De acordo com Chemello (2005), devido ao processo de tratamento de cor, os nutricionistas garantem que o mesmo retira as vitaminas e sais minerais, restando somente 99,8% de sacarose.

4.2.2 Açúcar cristal

Segundo Doce Aroma, Aditivos e Ingredientes, [200-], o açúcar cristal é o tipo de produto, no qual a maioria das usinas produz, a diferença de produção está no processo de clarificação que o caldo recebe.

O açúcar cristal, como o nome diz, é o açúcar com retículos cristalinos maiores, o qual, após o processo de cozimento, passa por etapas de refinamento para somente retirar cerca de 90% dos seus minerais (CHEMELLO, 2005).

De acordo com Doce Aroma, Aditivos e Ingredientes, [200-], um bom açúcar cristal, deve conter em média 99,65% de sacarose, e o restante em glicose e frutose, umidade e de sais minerais. Esse tipo de açúcar é empregado em grande escala pelas indústrias de bebidas, biscoitos e produtos de confeitaria em geral, tal fato ocorre pelo custo-benefício dessa matéria-prima (Machado, 2012). Em relação aos valores nutritivos, segundo Saúde-IG (2017), o açúcar cristal não possui nenhum benefício à saúde humana, e em 5 gramas de produto é possível encontrar carboidratos e 20 kcal.

4.2.3 Açúcar demerara

De acordo com a The Sugar Association (2017), o açúcar demerara é popularmente conhecido pelos ingleses e o que o difere dos tipos anteriores, é que este não passa pela adição de produtos químicos para tratamento de cor, logo, seus cristais contêm a cor marrom ou castanha, proveniente de excessos de melaço e mel do processo.

Segundo Chemello (2005), o tipo demerara é rico em nutrientes, e como alguns de seus retículos estão cobertos por mel ou melaço, o açúcar demerara é de difícil solubilização. A aplicação desse produto é em consumo de chás, cafés ou em cima de cereais quentes.

Em relação aos valores nutricionais, segundo o Saúde-IG (2017), em uma porção de 5 gramas de açúcar demerara é possível encontrar, 20 kcal, carboidratos, cálcio e ferro. Devido possuir alguns minerais, o valor desse tipo de açúcar é mais elevado, comparado ao cristal e branco.

4.2.4 Açúcar mascavo

O açúcar mascavo é praticamente bruto, pois, no fim do processo ele não passa por nenhum tipo de refinamento, cristalização e tratamento de cor, possui alto teor de umidade, e possui a coloração e gosto similar a da rapadura. Alguns nutricionistas consideram o mascavo rico em nutrientes, por não passar pelo tratamento igual aos demais açúcares e possuir a sacarose em menor concentração (cerca de 90%), porém é válido ressaltar, que para a quantidade de minerais que o nosso organismo precisa, seriam necessárias grandes porções de açúcar, o que não se torna saudável, sendo aconselhável ingerir outras fontes de minerais (CHEMELLO, 2005).

Segundo Machado (2012) a aplicação do açúcar mascavo é predominante na fabricação de bolos, pães e biscoitos integrais, os valores nutricionais do açúcar mascavo são parecidos ao açúcar demerara (SAÚDE-IG, 2017)

4.2.5 Açúcar refinado

Ainda de acordo com o Saúde-IG (2017), o açúcar refinado é o mais consumido mundialmente, na sua forma pura, ou em alimentos industrializados, devido a sua fácil dissolução.

Esse tipo de açúcar é puro, não contém corantes, e de acordo com Doce Aroma, Aditivos e Ingredientes [200-], o processo para obtenção do açúcar refinado, se baseia na dissolução do açúcar cristal, e posteriormente por uma etapa de secagem e refinamento. Esse produto possui um baixo teor de umidade, e cristais mais definidos, ou seja, de granulometria uniforme (Machado, 2012).

Em relação aos benefícios à saúde humana, o açúcar refinado não possui nenhum, possui mesmas calorias dos demais, e não é encontrado qualquer mineral (SAÚDE-IG,2017).

4.2.6 Açúcar *very high polarization* (VHP)

Segundo Hamerski (2009), o açúcar VHP, possui coloração mais clara que o demerara, e também possui retículos amarelados, pois, durante o processo de fabricação, o VHP não passa pelo tratamento de cor utilizando dióxido de enxofre

(SO₂). É considerado o açúcar mais exportado pelo Brasil, onde deve ser refinado e passado pelo tratamento de cor pelas usinas no exterior.

Devido à vasta utilidade do açúcar e sua importância para a alimentação humana, o agronegócio da produção de açúcar afeta a economia do mundo inteiro, e principalmente do Brasil, considerado um produtor notável no mercado, tornando imprescindível estudar a relevância do produto na economia (LIEBERG, 2014).

4.3 Mercado do açúcar

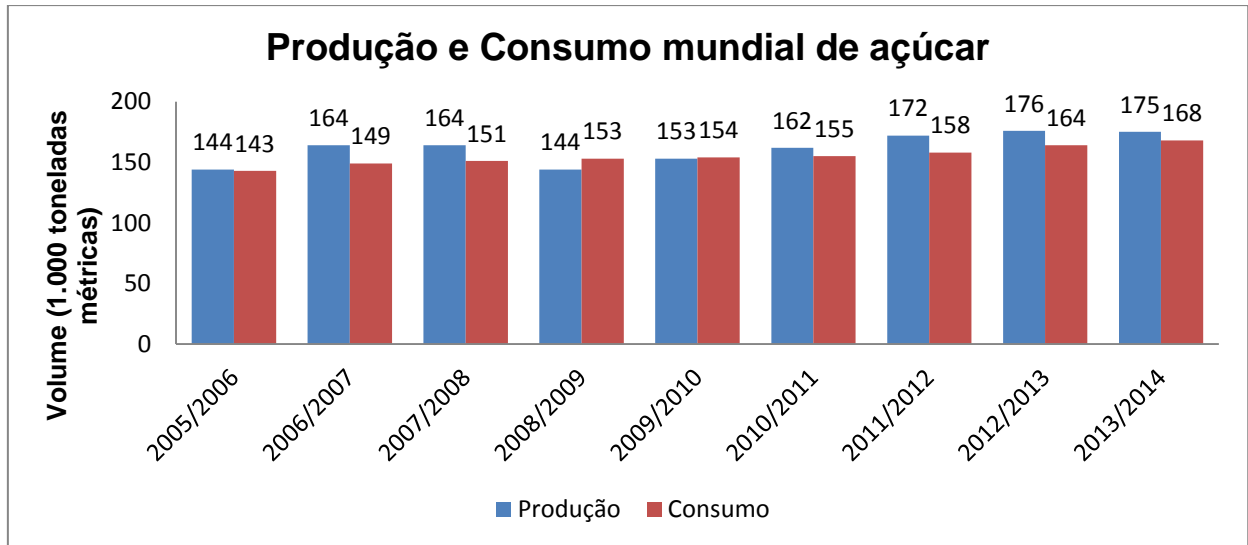
O mercado considera o açúcar como uma *commoditie*, ainda de acordo com Lieberg (2014), na visão de economistas, é um bem de consumo que seja escasso e que possui importância no desenvolvimento da economia de um país e no mundo. Existem diversos fatores que influenciam nos valores das *commodities*, como por exemplo, as mudanças políticas em certos países.

O açúcar pode sofrer grande instabilidade de preços, devido este ser formado através de fundamentos econômicos, como as curvas de oferta e demanda. A primeira é a porção de produto oferecido versus seu relativo preço, e a segunda é a porção que os clientes desejam comprar baseado no valor do produto. (RUMÁNKOVA; SMUTKA, 2013).

Segundo Couteur e Burreson (2003), em meados de 1900 e 1964, o açúcar aumentou 700% em sua produção mundial, posteriormente, já em 1996, segundo Lieberg (2014), houve uma pequena redução desse crescimento, devido ao aparecimento dos adoçantes artificiais nos países desenvolvidos, os quais são geralmente buscados pelos consumidores devidos às preocupações com dietas que contém excesso de açúcar. Enquanto isso, os países em desenvolvimento aumentaram suas importações e exportações.

A produção de açúcar no mundo, em 2014, foi de cerca de 175 milhões de toneladas, sendo consumido cerca de 168 milhões de açúcar. Através do GRAF. 1 é possível perceber que nos últimos anos, a produção de açúcar conseguiu atender a demanda (LIEBERG, 2014).

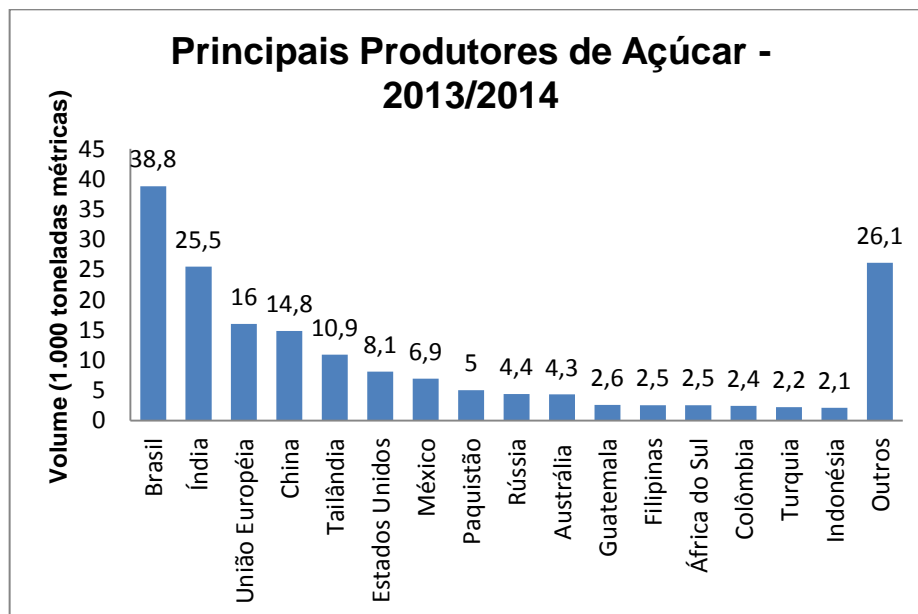
Gráfico 1 - Produção e Consumo mundial de açúcar



Fonte: Lieberg, 2014, adaptado Morais, P. C.

O Brasil foi o maior produtor, com 22%, na representação mundial, seguido da Índia e União Europeia, conforme representado no GRAF. 2 (LIEBERG, 2014).

Gráfico 2 – Principais Produtores de Açúcar 2013/2014



Fonte: Lieberg, 2014, adaptado Morais, P. C.

De acordo com a ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION-OECD-FOA, (2016) o preço do açúcar bruto mundialmente deve aumentar de forma moderada, em consequência das grandes exigências e dos baixos preços do petróleo, o qual

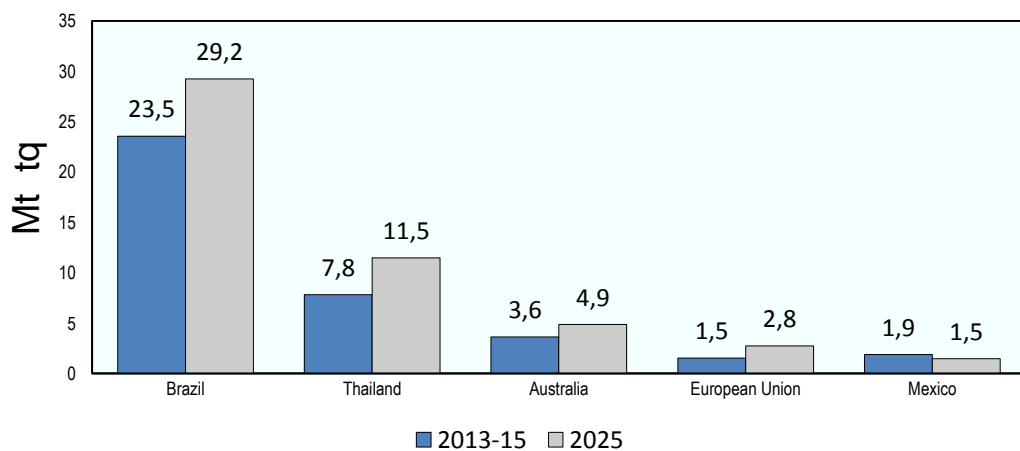
deverá alcançar a faixa de 342 USD/t até 2025, porém, antes de haver esse crescente aumento dos preços, em 2017, espera-se uma caída dos mesmos, devido à redução de importações da União Europeia desse produto, após a revogação de quotas.

O mercado do açúcar brasileiro vem passando por problemas financeiros há vários anos. Aproveitando a desvalorização do real, e o apoio político para a produção de combustível, as indústrias açucareiras devem utilizar a cana-de-açúcar para uma maior produção de etanol, porém, a aplicação dessa matéria-prima para a produção de etanol deve reduzir vagarosamente em perspectiva (LIEBERG, 2014).

O mercado de certos produtos é impulsionado por ofertas e demandas, e do açúcar não é diferente, OECD-FOA (2016) referencia que futuramente haverá enorme demanda de açúcar, todavia, também haverá um progresso no setor, em países que também vão aumentar a exportação, sendo eles a Austrália, União Europeia e Tailândia. O Brasil seguirá sendo o maior produtor e exportador do produto, embora seja afetado na participação do mercado em alguns períodos, pode optar pela produção de etanol se for mais rentável.

No GRAF. 3 apresentado por OECD-FOA (2016), é possível perceber a mudança de mercado no período de 2013 a 2015, frente à perspectiva até 2025 das exportações feitas entre os maiores produtores de açúcar, visto que o Brasil continua pioneiro nas exportações.

Gráfico 3 – Exportações de Açúcar para os principais países e regiões

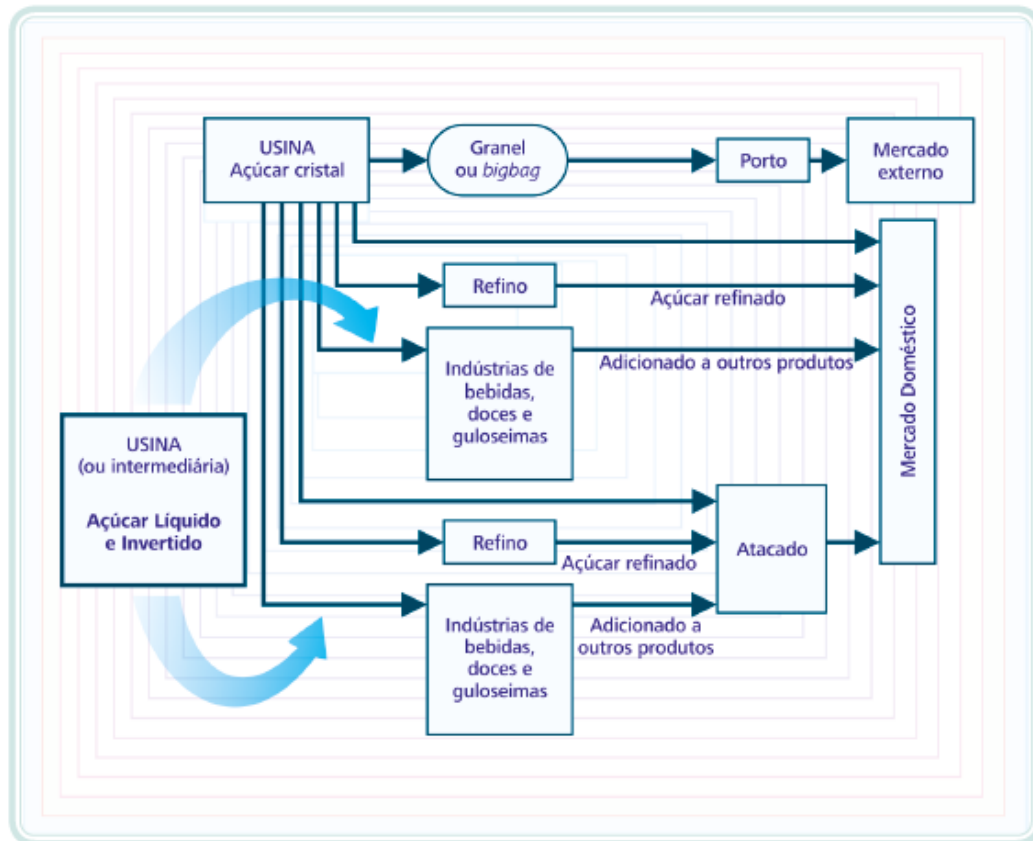


Fonte: OECD-FOA (2016), adaptado Morais, P. C.

Segundo Machado (2012) as usinas de açúcar no Brasil atendem aos mercados internos e externos, sendo que, no primeiro, ocorre em uma porcentagem

inferior ao mercado externo, aproximadamente de 37%. A FIG. 4 mostra a distribuição dos açúcares produzidos pelas usinas em seus respectivos mercados.

Figura 4 – Destino do açúcar ao mercado externo e doméstico



Fonte: MACHADO, 2012, p.19.

Embora a cana-de-açúcar possua grande magnitude no agronegócio, e a produção de açúcar possua grande participação na economia mundial, de acordo com Hamerski (2009), os estudos científicos ainda tem muito que colaborar para um maior desenvolvimento do processo, desde o âmbito da agrícola á indústria.

5 PRODUÇÃO DO AÇÚCAR DE CANA

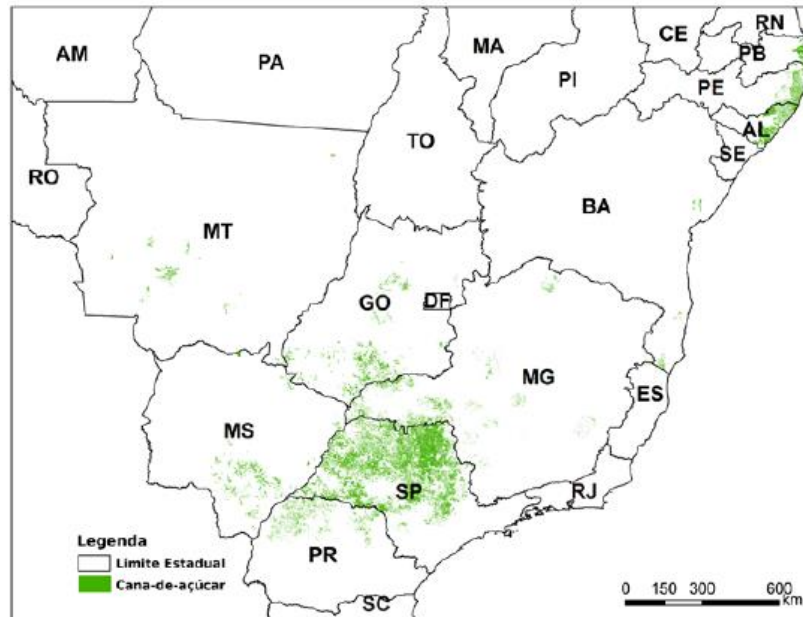
Segundo Rosa (2005), o açúcar de cana é o principal produto do mercado mundial, desta forma se torna importante estudar a mesma, pois, a qualidade da matéria-prima interfere diretamente no processo industrial.

5.1 A Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar se originou na Indonésia e Nova Guiné, anos mais tarde se propagou para as ilhas do Oceano Pacífico até chegar à Índia, onde foi considerada como produtora principal de açúcar (Hamerski, 2009). A cultura da cana se iniciou por volta do século XVI no Brasil, devido a colonização e aproveitamento das riquezas do território (RODRIGUES, 2010).

O país se tornou o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, logo após vem Índia, Tailândia e Austrália. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento-MAPA (2017), a estimativa de produção de cana para a safra de 2016/2017 foi de aproximadamente 632.879.440 toneladas. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB (2015) no território brasileiro, o estado que se destaca na cultura de cana, é o estado de São Paulo, que foi pioneiro no cultivo, como pode ser observado na FIG. 5, que mostra o mapeamento das regiões que cultivam essa planta.

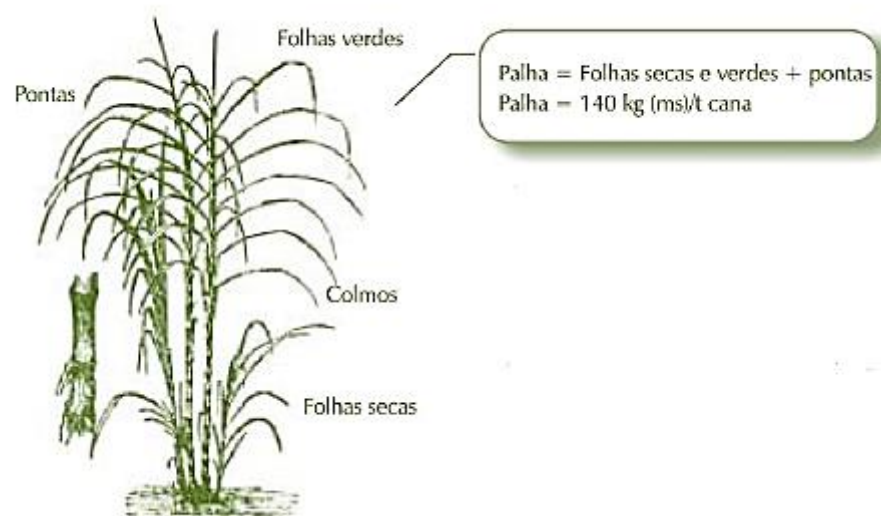
Figura 5 – Mapeamento do cultivo de cana-de-açúcar



Fonte: CONAB,2015, p.34.

Segundo Manochio (2014), a cana-de-açúcar (*Saccharum*) é uma planta pertencente á família das gramíneas, possui um caule que lembra um bambu, denominado colmos, nos quais se concentram a sacarose, já a palha é localizada ao seu redor, nas pontas e folhas. A FIG. 6 mostra a estrutura da cana-de-açúcar, com os seus principais constituintes vegetais.

Figura 6 – Estrutura da cana-de-açúcar



Fonte: Manochio, 2014, p.8, adaptado MORAIS, P.C.

As espécies cultivadas para a indústria sucroalcooleira são várias, porém as mais encontradas na literatura são *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. sinense*, *S. edule* e *S. robustum*, todas originárias do gênero *Saccharum*. (HAMERSKI, 2009).

As condições climáticas influenciam na cultura da cana-de-açúcar, como em diversas plantas, porém não é lucrativo para a indústria, cultivar uma matéria-prima ruim, ou seja, com pouco teor de sacarose, pois, resultaria em pouca entrada de sacarose e assim redução na produção de açúcar (Hamerski, 2009). A TAB. 1 mostra a composição da cana-de-açúcar e suas respectivas porcentagens em média, considerando uma cana de bom cultivo e boa qualidade.

Tabela 1 – Composição da cana-de-açúcar

Componentes	%
Água	71,04
Brix	16,20
Sacarose	14,40
Pureza	88,88
Fibra	9,56
Corantes e Graxas	0,35
Cinzas	0,48

Fonte: Castro, 2011, p.5.

Segundo Castro (2011), o Brix é a porcentagem de sólidos solúveis no caldo da cana, e é relacionada ao teor de sacarose, a pureza equivale à relação do teor de sacarose, pelo teor de sólidos solúveis. A fibra é a parte restante da planta depois de retirado o caldo, ressaltando que uma cana que possui muita fibra dificulta uma boa extração do caldo, e as cinzas, são os minerais que estão presentes na planta, entres eles o Mg (Magnésio), Ca (Cálcio) e Si (Silício).

Após o plantio e o cultivo da matéria-prima chega o momento da colheita, essa ocorre posteriormente às análises de maturação que define se a cana-de-açúcar está apta para ser processada na indústria (MANOCHIO, 2014).

5.2 Estágio de maturação e colheita

Segundo Machado (2012), a cana-de-açúcar, como matéria prima, está exposta á variáveis de clima, solo, maturação, tamanho do canavial, qualidade e quantidade de fertilizantes utilizados, entre outros fatores, os quais definem a qualidade da matéria-prima. Portanto, a avaliação da maturação da cana-de-açúcar, se torna fundamental para todo o processo, e de acordo com Hamerski (2009), a produtividade e qualidade do caldo estão ligadas diretamente ao estágio de maturação da planta.

O ponto de maturação é avaliado pela equipe de laboratório, geralmente, a equipe do laboratório de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (PCTS), que analisa a porcentagem de sólidos solúveis do caldo ($^{\circ}$ Brix), que está relacionado ao teor de sacarose, ou seja, um caldo rico em sacarose resultará em um valor alto de $^{\circ}$ Brix (FERNANDES E ALMEIDA, 2011).

Segundo Hamerski (2009), a maturação está envolvida em um processo no qual a planta chega ao ponto alto de sacarose. Quando atingido, a cana-de-açúcar por um processo natural, começa a fazer hidrólise da sacarose, convertendo-a em glicose e frutose, assim, o período de utilização da cana-de-açúcar no processo industrial, começa quando ela já possui um teor mínimo de sacarose (estabelecido pela empresa) e termina um pouco antes de o teor de sacarose baixar. Deve-se ressaltar que, além dos sólidos solúveis, existem variáveis, como a quantidade de fibra, açúcares redutores e pureza do caldo, que podem auxiliar na determinação, da planta apta para a colheita.

A colheita tem ainda como variável o clima onde está localizado a indústria e o canavial. No Brasil a safra geralmente está entre os meses de março à dezembro, podendo ser antecipado o fim, devido ser um período chuvoso, dificultando o transporte da matéria-prima até a indústria (Fernandes e Almeida, 2011).

A cana-de-açúcar pode ser colhida verde, neste caso crua, ou queimada, através do corte manual ou mecanizado, sendo que no corte mecanizado pode ser colhida na forma inteira ou picada, sendo avaliado pela parte agrícola da empresa o mais favorável, dependendo de topografia do canavial até os recursos disponíveis para o corte. Pode ser necessário estocar a cana no pátio da indústria, por no máximo 48 horas, pois, a partir disso o teor de sacarose começa à decair e também

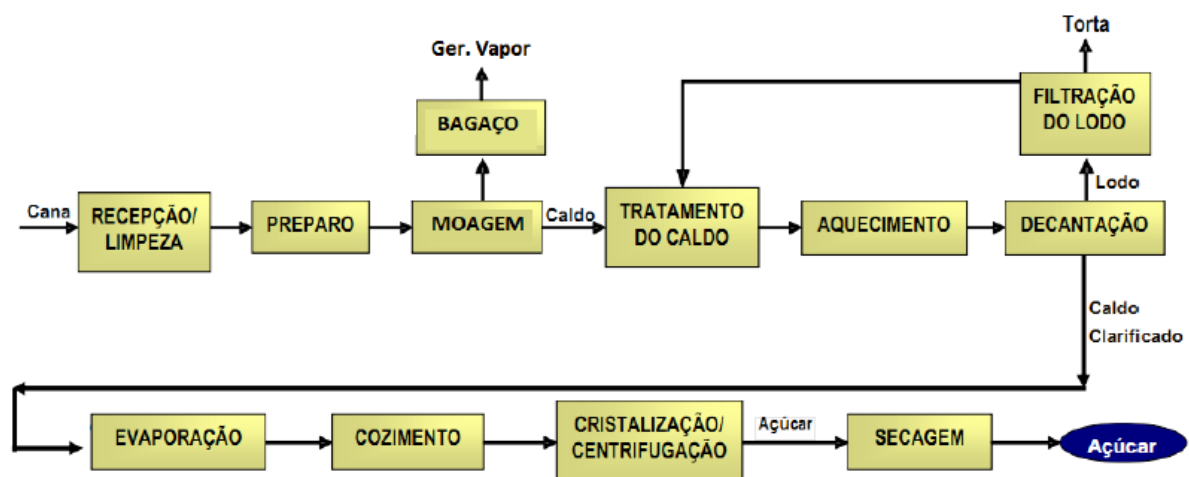
os colmos começam a ressecar, dificultando a extração do caldo durante a moagem (HAMERSKI, 2009).

Após a colheita da cana a mesma é transportada para a indústria, realizado geralmente através de caminhões canavieiros pelas rodovias, então, a matéria prima chega ao parque industrial para dar início ao processo de fabricação de açúcar (SHREVE E BRINK, 2014).

5.3 Processo de produção do açúcar de cana

Segundo Silva et al. (2008), as indústrias sucroalcooleiras brasileiras possuem praticamente o mesmo processo produtivo do açúcar de cana. A FIG. 7 mostra o diagrama de blocos para o processo de produção do açúcar.

Figura 7 - Diagrama de blocos da produção do açúcar



Fonte: FERNANDES E ALMEIDA, 2011, p. 13.

Segundo Shreve e Brink (2014), o processo possui etapas que são consideradas como operações unitárias e de conversões químicas.

De acordo com Fernandes e Almeida (2011), o fluxograma de processo do açúcar (FIG. 8) pode ser subdividido em setores, os quais existem as operações unitárias e suas respectivas funções:

- Lavagem da cana: Etapa na qual ocorre a lavagem da cana-de-açúcar provida do campo;
- Moagem: Etapa de extração do caldo;

- Combustão: Energia gerada através da queima do bagaço para alimentar a própria usina;
- Clarificação: Etapa onde ocorrem reações químicas para clarificar o caldo;
- Decantação: A partir da decantação e sedimentação é retirada matéria indesejada;
- Filtração: O lodo proveniente da decantação pode haver açúcar, desta forma passa por filtros para evitar perdas;
- Evaporação: Operação unitária que visa concentrar o caldo em xarope;
- Cristalização: O xarope vindo da evaporação passa pelo cozimento e formação de uma massa;
- Centrifugação: Através de turbinas centrífugas, o açúcar é separado do melaço;
- Secagem: Etapa final, onde é retirado a umidade do açúcar e o mesmo é resfriado.

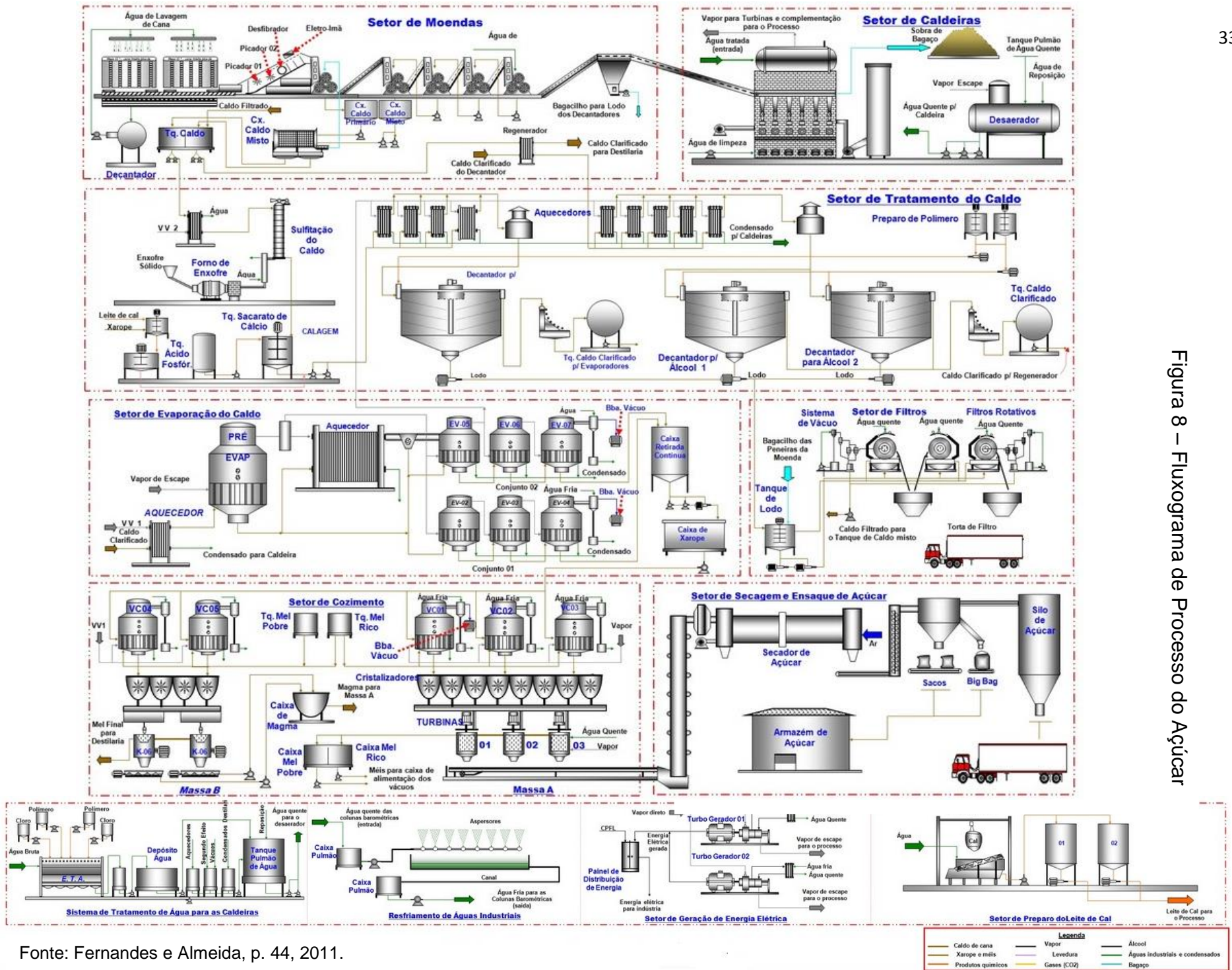


Figura 8 – Fluxograma de Processo do Açúcar

Fonte: Fernandes e Almeida, p. 44, 2011.

5.3.1 Lavagem da cana-de-açúcar

A lavagem da matéria-prima é o primeiro passo no processo industrial, é através da lavagem que se reduz as terras e outros detritos que estão com a cana desde seu cultivo até o seu transporte à empresa. Geralmente são utilizados jatos de água posicionados na vertical antes dos ternos da moenda, bem no princípio da recepção da cana (GONÇALVES FILHO; BARROS; CAMPOS, 2015).

A operação da lavagem, segundo Payne (2010), é feita através de jatos de água que utilizam o efeito de cascata, em um fluxo turbulento, ou seja, com grande quantidade de água, e através das fissuras da rampa, é eliminada a terra. Embora se utilize muita quantidade de água, de acordo com Castro (2011), a água utilizada para a lavagem da cana, pode ser de reuso ou mesmo limpa.

Ainda de acordo com Castro (2011), esta operação pode ser realizada com água ou a seco, tecnologia que está sendo implantada ainda. No caso com água, pode ser fria ou quente, quando quente, são aproveitadas as águas vindas dos condensadores. Destaca-se que a água sai dos jatos sob pressão para uma melhor eficiência na limpeza, podendo ser gasto 5 m³ de água, por tonelada de cana, em cada hora do processo.

5.3.2 Extração da sacarose ou moagem

Segundo Silva (2013), a moagem é um dos estágios mais importantes no processo das indústrias sucroalcooleiras, pois, os açúcares contidos na cana, que são a matéria prima principal dos produtos primários estão aglomerados no caldo, e o restante do processo tende a manipular o caldo extraído para chegar ao produto final.

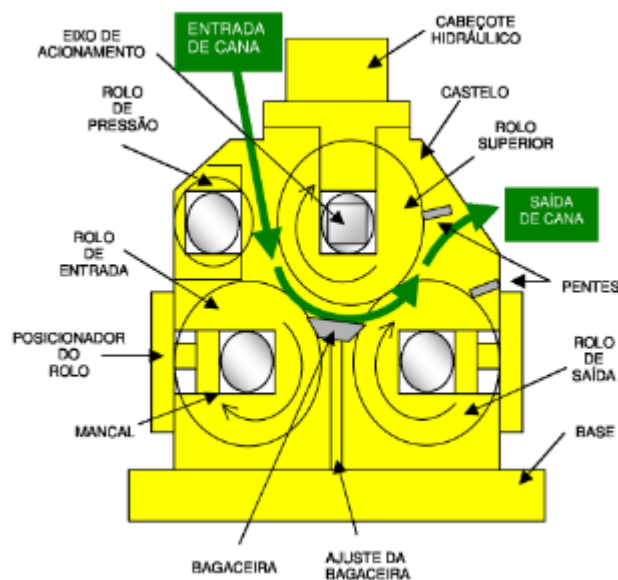
Após a lavagem da cana na mesa alimentadora, a cana conduzida por uma esteira rolante, passa pelos picadores e desfibradores, etapa também chamada como preparo da cana (MACHADO, 2012). Segundo RIBEIRO (1999), esse preparo serve para o rompimento da parte dura da cana, e a ruptura das células que contem sacarose, deixando-as mais expostas para fácil extração do caldo.

No mercado existem dois tipos de extração, por moagem ou por difusores, sendo largamente empregada nas indústrias brasileiras atualmente, a moagem

através da moenda, o qual o presente trabalho vai considerar no processo (SILVA, 2013).

Desta forma, segundo Ribeiro (1999) a cana desfibrada é transportada até a moagem, através de uma esteira de borracha, pois, antes da moagem é situado um eletroímã, para retirar de qualquer corpo estranho metálico presente na cana, para não deteriorar os rolos presentes nos ternos de moenda. Segundo Hamerski (2009), os ternos são compostos por três rolos cada, formando um triângulo, cuja função é esmagar a cana mais de uma vez para uma melhor extração do caldo. A FIG. 9 mostra o modelo representativo de um terno de moenda, onde é visto o rolo superior (móvel), o rolo de entrada e saída (fixos), bem como o movimento da fibra da cana.

Figura 9 – Modelo representativo de um terno de moenda



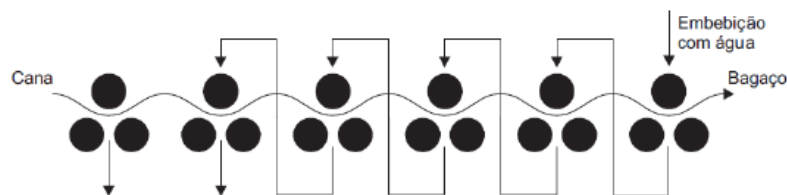
Fonte: RIBEIRO, 1999, p. 24.

Segundo Ribeiro (1999), geralmente são utilizados de 4 a 5 ternos nas usinas, e para ter uma maior eficiência de extração, ocorre a embebição do bagaço, que é a adição de água ou até mesmo caldo no processo.

Ainda de acordo com Ribeiro (1999), o processo de embebição pode ocorrer de forma simples, ou composta. No primeiro caso a água é adicionada somente em pontos específicos sobre a cana, e a embebição composta, é aplicação de água no último terno, sendo o caldo extraído dessa ação inserido no penúltimo terno, repetindo o processo até chegar ao segundo terno, como mostrado na FIG.10. No primeiro terno o caldo é rico em sacarose, ou seja, de °Brix (porcentagem de sólidos

solúveis) alto (18 a 22) então chamado de caldo rico ou caldo primário, e o caldos obtido na embebição composta é chamado de caldo pobre ou secundário, e possuem °Brix baixo (14 a 16), e ainda existe a mistura do primário e secundário, denominado caldo misto. (FERNANDES E ALMEIDA, 2011).

Figura 10 – Esquema da extração do caldo por moendas, e o modo de embebição



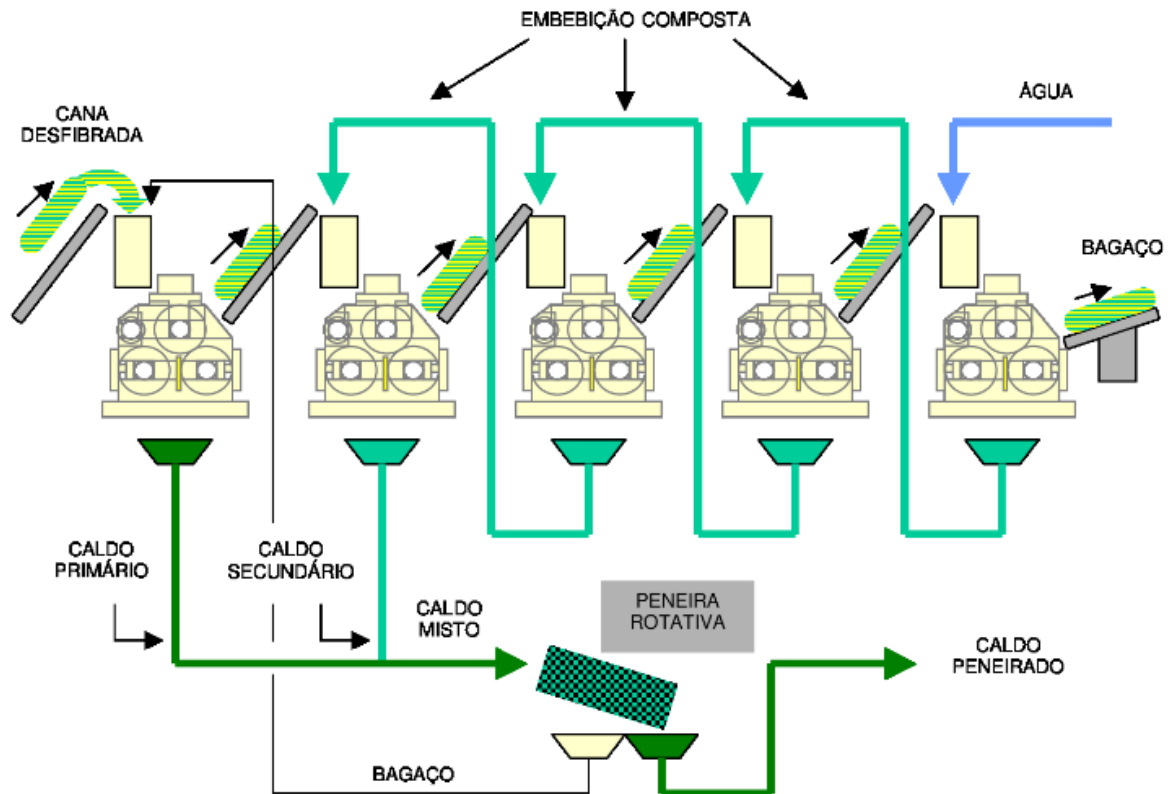
Fonte: FERNANDES ; ALMEIDA,2011, p.16.

5.3.2.1 Peneiramento do caldo

Segundo Hamerski (2009), existem três tipos de peneiras utilizadas para retirar pequenas fibras, terras ou areia presentes no caldo, são elas: peneiras fixas, vibratórias e rotativas. As mais utilizadas pela viabilidade do processo são as rotativas, nas quais o caldo passa por ela, e a mesma pelo movimento rotativo, vai separando e retirando os rejeitos dela própria, erradicando qualquer tipo de entupimento. Desta forma o caldo passa pela peneira e cai em um tanque posicionado sob ela, preparado para a próxima etapa do processo, e o bagaço removido pela peneira volta para a esteira de bagaço.

A FIG. 11 mostra o esquema de embebição composta, bem como o uso da peneira rotativa no fim do processo de extração do caldo.

Figura 11 – Esquema de embebição e filtração do caldo.



Fonte: RIBEIRO, 1999, pag. 26.

5.3.2.2 Bagaço

O bagaço gerado pela extração do caldo é transportado por esteiras até o sistema de caldeiras, onde é incinerado e o calor gerado é utilizado para a produção de energia, processo conhecido bioeletricidade. Durante o processo, as moendas podem ser acionadas por energia elétrica ou pelo próprio vapor gerado pela queima do bagaço (FERNANDES E ALMEIDA, 2011).

5.3.3 Tratamento do caldo

Segundo Castro (2011), os particulados insolúveis são retirados através do peneiramento, porém restam no caldo ainda material solúvel, como graxas, ceras, proteínas, entre outros, assim, se faz necessário a utilização de um tratamento no caldo, chamado de clarificação.

Fernandes e Almeida (2011) cita a importância dessa etapa no processo, pois, a clarificação tem como objetivo obter um caldo mais limpo e claro, através de

processos como coagulação, floculação e precipitação. Ainda apresentam os principais métodos utilizados nessa etapa, sendo eles:

- Calagem, caleação ou defecação;
- Sulfitação;
- Fosfatação;
- Carbonatação;
- Uso de óxido de Manganês.

A qualidade da clarificação é primordial, pois, segundo Hamerski (2009), esta etapa influencia desde o progresso do processo até a morfologia dos cristais de açúcar formados no produto.

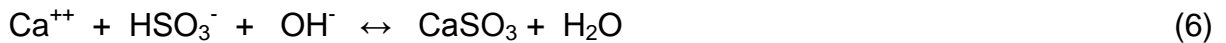
Ainda de acordo com Fernandes e Almeida (2011), os principais tratamentos utilizados no Brasil são a sulfitação e calagem, os quais este trabalho irá abranger.

5.3.3.1 Sulfitação

O processo de sulfitação de acordo com Hamerski (2009) é uma das principais etapas no tratamento de caldo nas usinas do Brasil, quando o objetivo é produzir um açúcar mais claro. Segundo Fernandes e Almeida (2011), na adição do enxofre (S) e sua combustão, através da queima em forno, é produzido o gás sulfuroso ou também dióxido de enxofre gasoso (SO₂), conforme a EQ.Q. (1), sendo reagente principal no processo de sulfitação.



Segundo Hamerski (2009), a sulfitação do caldo de cana, baseia-se na adição de dióxido de enxofre gasoso (SO₂), ao caldo misto, então já aquecido em uma temperatura em torno de 60°C por trocador de calor, chegando ao pH entre 3,8 e 4,2. O maior interesse para a sulfitação é a fase posterior, a calagem, onde o caldo vai ser neutralizado, formando compostos insolúveis, como sulfito de cálcio, como mostrado nas EQ. Q. (2) a (6). O fato do processo de sulfitação ser utilizado para produzir um açúcar mais claro ocorre pelo contato do gás sulfuroso com compostos coloridos, tornando-os incolores (FERNANDES; ALMEIDA, 2011).



O sulfito de cálcio então formado reage com os compostos coloridos sendo eliminados futuramente no processo de decantação, deixando o caldo mais purificado e claro. Fernandes e Almeida (2011) citam que os tratamentos podem ocorrer em diversas ordens, porém, o mais utilizado na prática é a sulfitação primeiro que a calagem, para que o caldo não fique com pH baixo por muito tempo, e dessa forma não induzindo a formação de gomas como a dextrana e levana.

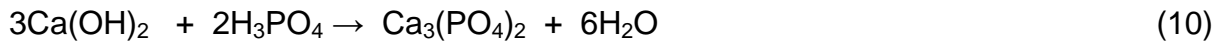
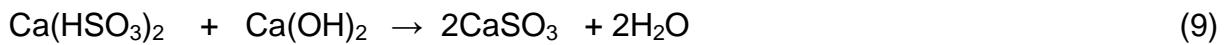
De acordo com Ribeiro, Blumer e Horii (1999) as gomas (polissacarídeos) além de trazer problemas no tratamento de caldo, prejudicam também a cristalização e centrifugação, além de interferir na qualidade do açúcar.

Segundo Ribeiro (1999), este processo ocorre em colunas de sulfitação, onde o gás de dióxido de enxofre é introduzido na parte inferior, e o caldo na parte superior, encontrando-se em contra corrente para uma maior absorção do SO_2 no caldo. Desta forma, o caldo sulfitado segue para o processo de calagem.

5.3.3.2 Calagem

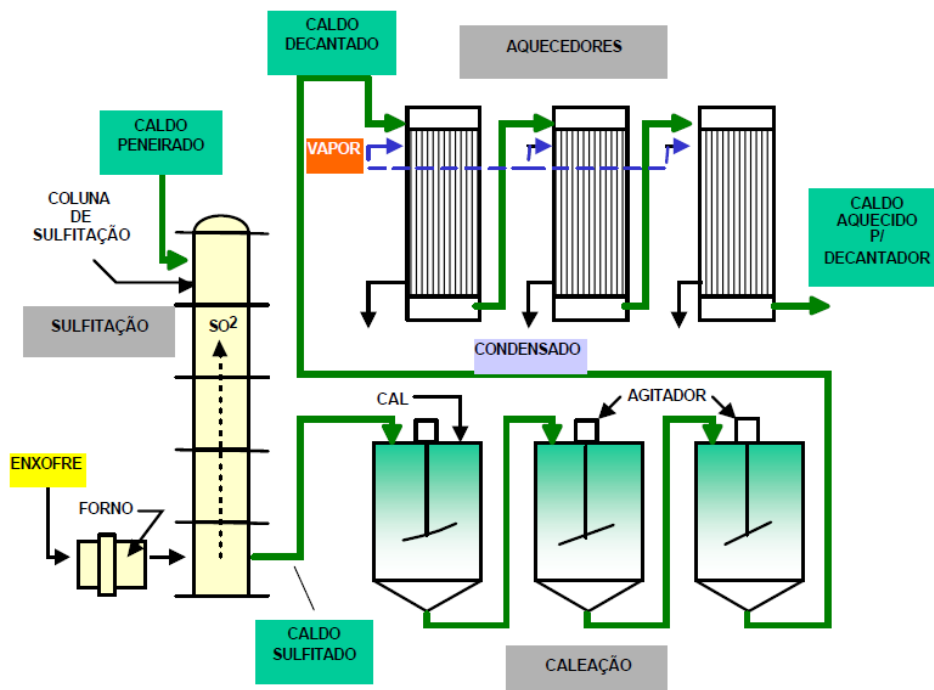
A Calagem eleva o pH do caldo que geralmente está entre 4,8 e 5,5 até entre 7,2 e 8,2, utilizando o leite de cal (cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) (CASTRO, 2011).

Segundo Hamerski (2009), a combinação da calagem com o aumento da temperatura, por volta de 105°C , resulta na formação de compostos de formação complexa, que possuem fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), bisulfito de cálcio ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$), sais de ácidos orgânicos, proteínas desnaturadas, entre outros compostos, que em pH neutro são insolúveis e irão precipitar durante a decantação, como mostrado nas EQ. Q. (7) a (10). Desta forma, como o interesse da calagem são os compostos à base de fosfato de cálcio e sulfito de cálcio para a formação dos complexos, de acordo com (FERNANDES; ALMEIDA, 2011).



A FIG. 12 mostra um esquema do processo de tratamento do caldo, onde o caldo peneirado passa pela sulfitação, seguida pela calagem e após aquecido passa pelo balão de flash até chegar ao decantador, etapa onde serão sedimentados todos os complexos insolúveis (RIBEIRO,1999).

Figura 12 – Esquema do processo de tratamento de caldo



Fonte: RIBEIRO, 1999, p. 36.

5.3.3.3 Balão de flash

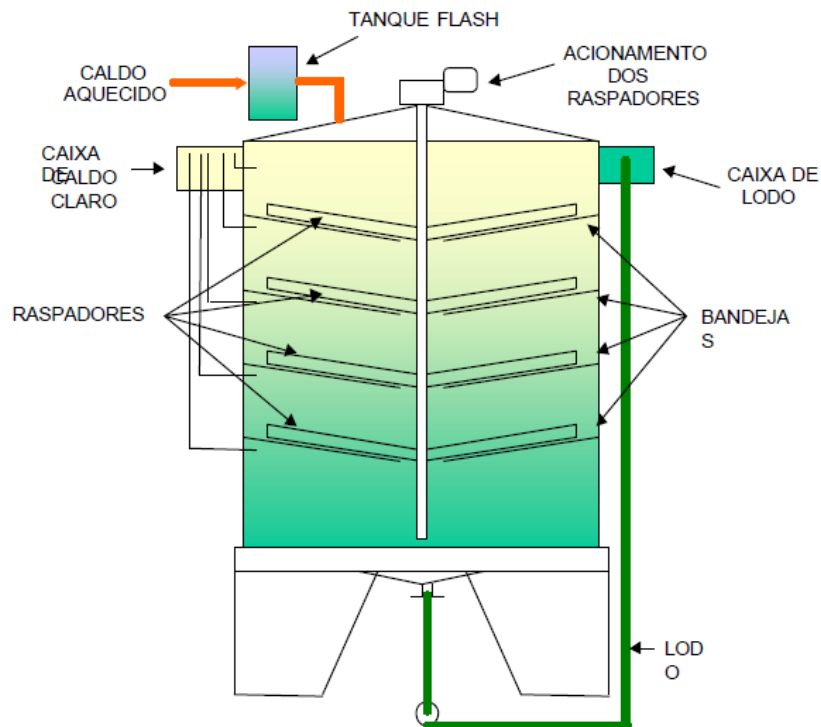
Segundo Fernandes e Almeida (2011), o balão de flash é um reservatório cilíndrico, colocado depois do decantador, similar a uma chaminé aberta ao ambiente, onde o caldo proveniente dos aquecedores, chega na vertical. Como o caldo está em uma temperatura alta, há uma evaporação espontânea, assim que chega a este recipiente, ocorrendo a destruição de possíveis bolhas de ar presentes no caldo para que não impeçam a decantação de nenhuma partícula em suspensão.

5.3.3.4 Decantação

Segundo Ribeiro (1999), após os processos de sulfitação, caleação, e flasheamento, o caldo vai para os decantadores de forma contínua para que seja feita a separação das impurezas, ou seja, para que elas se sedimentem, formando o lodo. O tempo de retenção do caldo nos decantadores varia entre 2 a 4 horas.

Existem dois tipos de decantadores, o convencional e o rápido, porém, nas usinas de açúcar o mais utilizado é do tipo convencional, como mostra o esquema na FIG. 13. (FERNANDES; ALMEIDA, 2011).

Figura 13 – Esquema de um decantador



Fonte: RIBEIRO, 1999, p. 36.

Através da FIG. 13, também é possível ver o posicionamento do balão de flash no processo de tratamento do caldo.

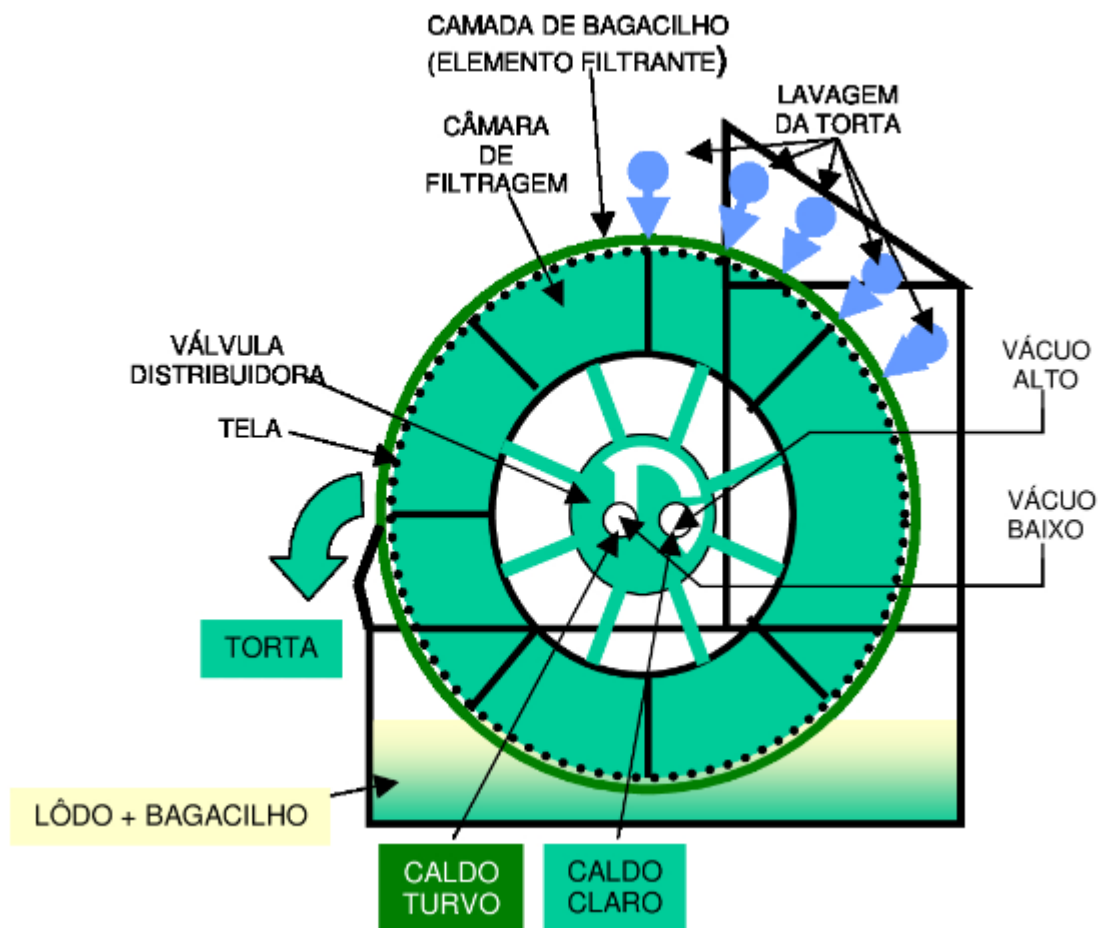
5.3.4 Filtragem do lodo

Segundo Shreve e Brink (2014), após a decantação é retirado do fundo dos decantadores uma massa escura composta de compostos sólidos insolúveis e

contendo uma relevante porcentagem de açúcar, denominada lodo. Essa massa é encaminhada para filtros rotativos à vácuo, filtros de prensa ou prensa desaguadora para que possa ser recuperado essa fração de açúcar, porém, o mais utilizado nas indústrias de açúcar, é o filtro rotativo à vácuo.

De acordo com Ribeiro (1999), esse tipo de filtro fica posicionado em cima de um recipiente com o lodo, onde é misturado ao lodo bagacilhos retirados na peneira rotativa da moenda, para que possua uma maior porosidade e melhor aderência ao filtro, essa mistura é denominada de torta de filtro. A filtragem da mesma ocorre por três regiões, zona de baixo vácuo, alto vácuo e zona de descarga, como mostrado na FIG. 14.

Figura 14 – Esquema ilustrativo de um filtro à vácuo



Fonte: RIBEIRO,1999, p. 40.

De acordo com Fernandes e Almeida (2011), o tambor gira em torno de um eixo horizontal, submerso à torta de filtro, na qual vai ser aderida à parede do filtro

pela zona de baixo vácuo, seção que está diretamente ligada à tubulação à vácuo. Na zona de alto vácuo é borrifado água geralmente quente na torta de filtro para melhor extração da sacarose, desta forma os caldos captados escoam para um tanque, onde é encaminhado para retornar ao processo na etapa de tratamento de caldo misto. E na zona de descarga, a torta praticamente seca pelo alto vácuo, é raspada da tela e cai em funis para o transporte até o cultivo de cana, utilizada como fertilizante.

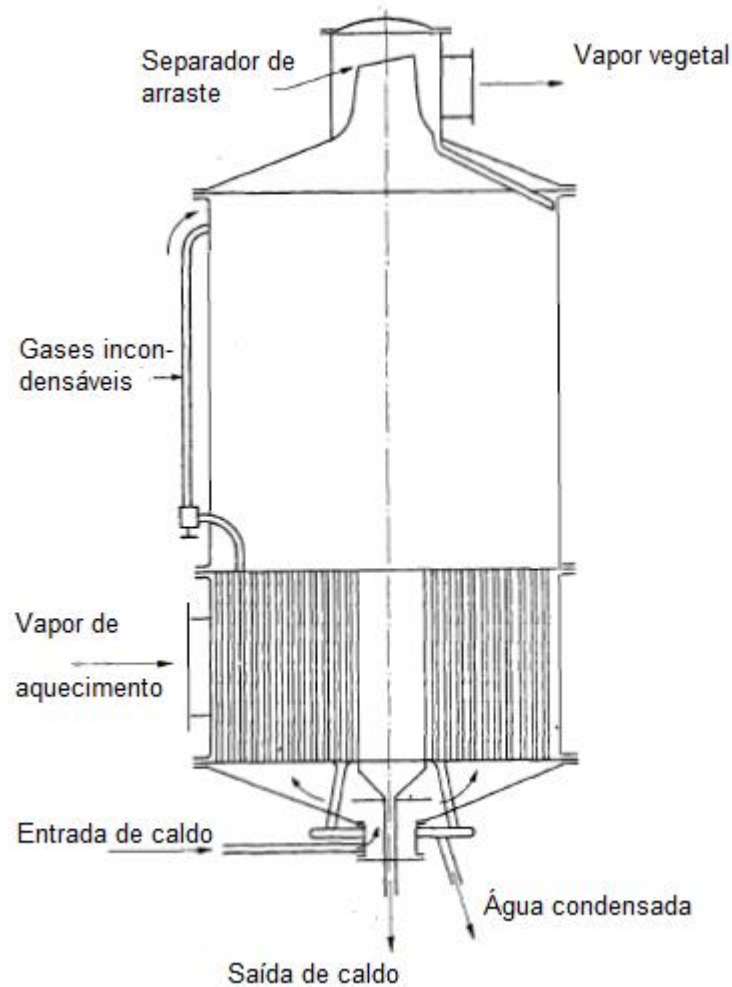
Ainda de acordo com Fernandes e Almeida (2011), quanto menor a rotação do filtro, melhor a lavagem, a rotação podendo ser entre 0,1 a 0,5 rotações por minuto (rpm).

5.3.5 Evaporação

Segundo Shreve e Brink (2014), após a decantação, o caldo clarificado é encaminhado para a evaporação, considerado uma operação unitária, projetada para concentrar o caldo, ou seja, evaporar a água presente no mesmo, ao chegar no evaporador o caldo possui cerca de 85% de água, e pode sair com até 40%.

Existem diversos tipos de evaporadores entre eles os modelos; Kestner placas, películas finas e o de Roberts, porém, no processo de produção do açúcar, a maioria das usinas utiliza o tipo Roberts como mostra a FIG.15, composto por uma calandra tubular para troca de temperatura, onde o vapor cerca os tubos externamente, e o caldo passa por esses tubos internamente, fazendo que ocorra a evaporação do caldo e condensação do vapor, e também as entradas e saídas de caldo e vapor (RIBEIRO, 1999).

Figura 15 – Esquema de um evaporador do tipo Robert

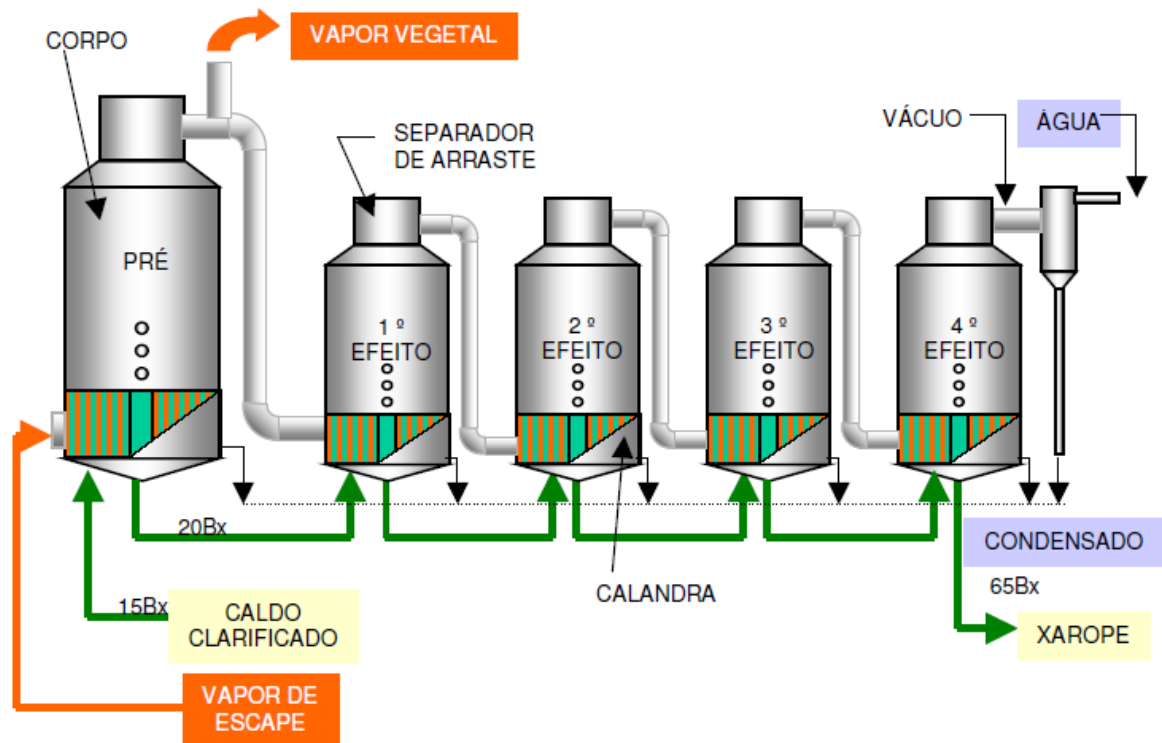


Fonte: HUGOT, 1969, p. 557.

De acordo com Rampazzo (2014), o processo de evaporação necessita de uma demanda alta de vapor, desta forma, é utilizado um pré-evaporador antes dos demais evaporadores, o qual utiliza o vapor vindo das turbinas e aquece o caldo uma primeira vez, e a água evaporada, captada em forma de vapor (vapor vegetal) é utilizado nos evaporadores de múltiplo efeito concorrente.

De acordo com Machado (2012), os evaporadores de múltiplo efeito estão ligados em série e se baseia no aproveitamento do vapor vegetal, de forma que o vapor que sai do primeiro evaporador passa pelo segundo e assim sucessivamente, como mostrado na FIG. 16. A água condensada alimenta o sistema de caldeiras para recomençar o ciclo do mesmo.

Figura 16 – Esquema dos evaporadores tipo Roberts, em múltiplo efeito, composto do pré-evaporador



Fonte: RIBEIRO, 1999, p. 45.

O processo que utiliza os evaporadores múltiplo efeito converte o caldo clarificado em xarope, parte fundamental, pois, o xarope deve ser transportado como um líquido ainda, e também precisa de pouca água para dissolver cristais falsos, que são criados devido ao aumento da temperatura no início do cozimento (FERNANDES; ALMEIDA, 2011).

Um bom xarope é fundamental para a continuidade do processo e eficiência do mesmo, desta forma, o caldo entra com brix entre 14 e 16° e sai como xarope de brix de 65 a 70°, ou seja, com boa porcentagem de sólido solúvel, sendo eles o açúcar (sacarose). Desta forma o xarope deixa o processo de evaporação e segue para o cozimento (MACHADO, 2012).

5.3.6 Cozimento

Nesse estágio o xarope chega aos cozedores, cuja função é concentrar o xarope e chegar ao brix de até 80°, ou seja, deixando de ser um fluido menos pastoso e tornando-o mais viscoso, de pouca fluidez, denominado massa cozida.

Durante o cozimento ocorre a cristalização do açúcar através da água de forma controlada (RIBEIRO, 1999).

Segundo Castro (2011), os cozedores à vácuo ou simplesmente cozedores, são vasos similares aos evaporadores, porém, possuem a diferença de operar com materiais mais densos e viscosos, e para isso trabalham com uma rede de vapor independente das demais e exclusiva para eles, além de durante o processo funcionar em modo de batelada.

Segundo Shreve e Brink (2014), a massa cozida é lançada num cristizador, para a formação completa dos cristais de açúcar e assim obtê-lo na forma bruta.

5.3.7 Cristalização

Após a saída do xarope do cozimento, o mesmo passa por uma caixa de armazenamento e é encaminhado para a etapa de cristalização, que a condução á evaporadores de simples efeito, ocorrendo geralmente em batelada. Nesta etapa, o xarope passa por uma concentração à vácuo até chegar ao estágio de supersaturação, que é a quantidade de sólidos dissolvidos por unidade de água contida na solução que está em supersaturação (MACHADO, 2012).

A supersaturação é responsável pela formação e crescimento dos cristais de açúcar, ainda de acordo com Machado (2012), a pureza do material está diretamente ligada á supersaturação, pois, menor pureza exige que haja um grau de supersaturação maior.

Segundo Fernandes e Almeida (2011), a cristalização tem como objetivo resgatar uma fração da sacarose que está ainda dissolvida nos méis, que são os produtos secundários da cristalização, sendo produto primário os cristais de açúcar. O processo de separação por cristalização pode ocorrer diversas vezes até que seja viável a retirada da sacarose dos méis.

A etapa de cristalização, segundo Ribeiro (1999), possui diversas variáveis que influenciam a velocidade dessa etapa, entre elas: a viscosidade do fluido, a temperatura, a supersaturação e a pureza do licor-mãe. Este licor é um rejeito do cozimento das massas que retorna ao processo, por isso, se faz necessário diferenciar o tempo de cozimento das massas, separando-as em massa A, massa B e massa C, onde:

- **Massa A:** É baseada no esgotamento da sacarose do xarope e tem início com o magma gerado pelo cozimento da massa C. Esta possui cristais de tamanho intermediário, e com o crescimento dos cristais ele consome toda a sacarose do licor-mãe (chamado de mel rico), que após a centrifugação é separado o açúcar desse licor, desta forma, o açúcar oriundo da massa A é considerado o melhor açúcar do processo.
- **Massa B:** É baseada no esgotamento da sacarose do mel rico, proveniente da massa A, que após a centrifugação separa-se o açúcar do licor-mãe, denominado mel pobre. O açúcar proveniente da massa B possui teor de sacarose menor comparado ao anterior, que devido não ser interessante a comercialização desse tipo de açúcar, o mesmo é novamente dissolvido ao xarope, aumentando assim a pureza do mesmo, para o refino granulado.
- **Massa C:** Fundamenta-se em esgotar a sacarose presente no mel pobre, proveniente do cozimento da massa B. Para o cozimento da massa C concentra-se um dos méis (pobre ou rico), até chegar numa supersaturação, fase onde é inserida uma semente (açúcar dissolvido com álcool isopropílico), ocasionando o crescimento dos cristais, posteriormente sendo centrifugado e separado o açúcar do licor-mãe (mel final).

O processo utilizando os três tipos de massas, pode diversificar entre as usinas, no Brasil geralmente é utilizado o cozimento das massas A e C, devido não ser viável a comercialização do açúcar da massa B (RIBEIRO, 1999).

Conforme o término de cada cozimento, a massa é centrifugada para a separação do açúcar dos méis (FERNANDES, ALMEIDA; 2011).

5.3.7.1 Centrifugação

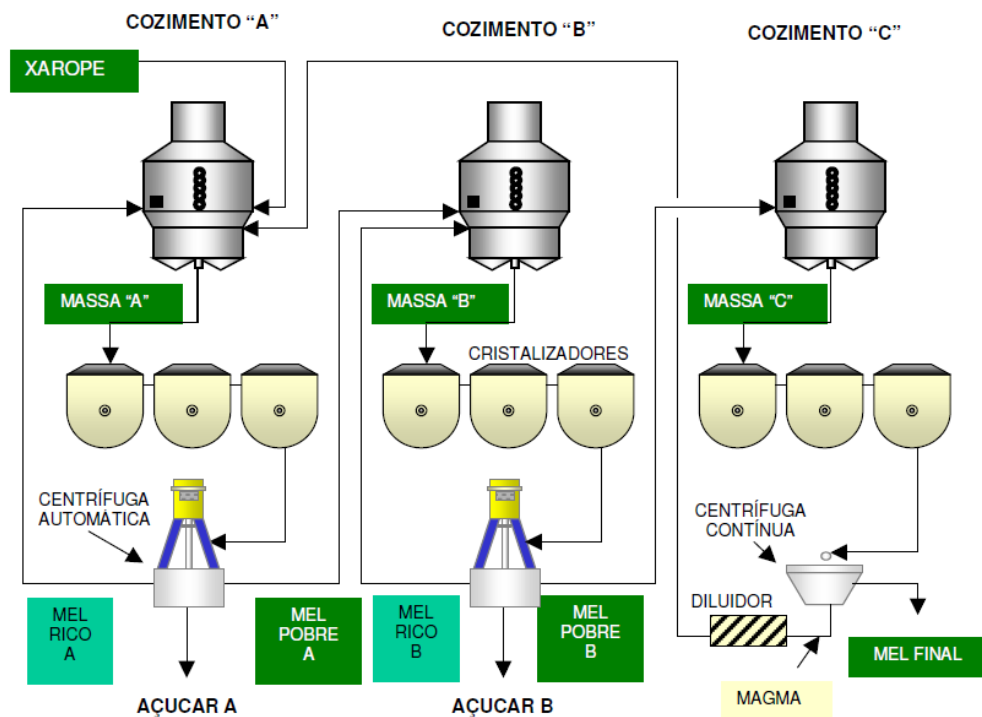
As centrífugas nas usinas podem funcionar em batelada ou de forma contínua, o que define o tipo de equipamento utilizado no processo. Vale ressaltar que as centrífugas em bateladas, são utilizadas para separar o açúcar proveniente das massas A e B, e as centrífugas contínuas normalmente são utilizadas para separar o açúcar oriundo da massa C, formando o magma que retorna para o cozimento das massas A e B (Ribeiro, 1999).

O processo de centrifugação ocorre em um equipamento que contém um reservatório com furos, onde a força centrípeta faz com que o mel passe pelos furos

deixando os cristais de açúcar no interior do mesmo, assim, esses cristais passam por uma lavagem com uma mistura de água e vapor para a remoção de restos de méis impregnados nos mesmos. O mel final é encaminhado para a fabricação de etanol, e o açúcar úmido vai para a secagem. (RAMPAZZO, 2014).

No esquema mostrado na FIG. 17, está representada a entrada do xarope para o cozimento, as respectivas massas passando pelos cristalizadores e por fim sendo centrifugadas, além dos méis sendo retornados ao processo, exceto o mel final, que é destinado à produção de etanol.

Figura 17 – Esquema do conjunto dos cozedores de massas A, B e C



Fonte: RIBEIRO, 1999, p. 63.

5.3.8 Secagem

Segundo Machado (2012), o açúcar, após o processo de centrifugação sai com uma umidade relativamente alta, e independentemente do tipo de açúcar, se faz necessário uma secagem, até a umidade chegar em torno de 0,1-0,2%.

A secagem ocorre pelo secador, que possui diversas partes, sendo a de aquecimento do ar que é impulsionado sobre o açúcar numa esteira, onde é então

removida a umidade, e a ventilação, que propicia a circulação do ar quente que provoca essa impulsão em contracorrente (RIBEIRO, 1999).

Segundo Fernandes e Almeida (2011), a secagem tem como objetivo impedir que o açúcar forme grandes aglomerações devido à alta umidade e também não haja deterioração do mesmo, e quando o açúcar sai da secagem entre 35 e 40°C, está preparado para armazenamento.

5.3.9 Armazenamento

Ainda de acordo com Fernandes e Almeida (2011) geralmente o armazenamento do açúcar ocorre em sacas de 50 kg, em big-bag de 1.500 kg ou também a granel, pois, a armazenagem varia conforme o tipo de açúcar produzido, espaço de armazém e também o desejo do cliente.

Segundo Machado (2012), o controle da matéria que entra e sai do processo é primordial na indústria do açúcar, pois, através deste é possível medir perdas, dimensionar equipamentos e compreender a eficácia do processo. O presente trabalho tem como finalidade estudar um controle eficiente das variáveis presentes na extração do caldo da cana-de-açúcar, desta forma, o mesmo vai direcionar-se ao estudo desta importante etapa do processo.

6 BALANÇO DE MASSA NA EXTRAÇÃO DO CALDO DE CANA

Segundo Felder e Rousseau (2014), quando se analisa um processo ou parte dele, é necessário avaliar toda a matéria que entra e sai do mesmo para controlar e minimizar possíveis perdas, lembrando-se, que a lei de conservação da massa deve ser respeitada, na qual estabelece que nenhuma massa pode ser criada e nem destruída, assim, em um processo a expressão “massa total de entrada = massa total de saída” refere-se ao termo balanço de massa, utilizado muito na linguagem da engenharia.

Aplicando-se o balanço de massa ao sistema de extração do caldo de cana-de-açúcar, em forma de diagrama de blocos, de acordo com a bibliografia, se tem 1050 kg/h de entrada de matéria, o balanço ao longo da etapa de extração do caldo é mostrado no esquema da FIG.18 (ROUSSELET, 2011).

A cana passa pela lavagem onde são removidas as impurezas (retiradas do processo), para posteriormente ser transportada para o preparo, onde é triturada e esmagada para remoção do caldo, sendo que em seguida vai para a moagem e embebição, etapa com alimentação de água para embebição do bagaço para melhor extração. Desta forma, saem da moagem, a fibra ou “bagaço” com mínima umidade possível e o caldo com cerca de 980 kg e °Brix entre 14 e 16, transportado para o peneiramento do mesmo (ROUSSELET, 2011).

Figura 18 - Esquema do balanço de massa na extração do caldo de cana



Fonte: ROUSSELET, 2011, p. 39, adaptado por Morais, P.C.

Embora o balanço de massa do material de entrada e saída da etapa de extração do caldo seja importante, segundo Machado (2012), para a indústria açucareira é de extrema importância, realizar um balanço de massa para os açúcares redutores totais (ART), sendo eles a glicose, frutose e a sacarose, pois, o ART é considerado a matéria prima principal do processo, e não a cana bruta, como no esquema da FIG. 18. Através do balanço de massa do ART, é possível encontrar e quantificar as perdas de açúcar do processo.

O balanço de ART na etapa de extração de sacarose é feita no caldo primário, através das EQ. (11) e (12) (BEM DAL, KOIKE E PASSARINI, 2006).

$$m_{\text{ARTcp}} = \text{ART} \cdot m_{\text{cpcts}} \cdot [E_{\text{ept}} \cdot (1 - P_{\text{ir}}/100 - P_{\text{L}}/100) - P_{\text{iept}}/100]/1000 \quad (11)$$

Onde:

m_{ARTcp} = fluxo de massa de ART no caldo primário [t/h];

E_{ept} = eficiência de extração do primeiro terno [%];

P_{iept} = perda indeterminada de massa de ART no primeiro terno;

m_{cpcts} = massa de cana de acordo com as análises do laboratório PCTS;

P_{ir} = perda inderteminada na recepção;

P_{L} = perda na lavagem.

$$v_{\text{cp}} = [E_{\text{ept}} \cdot m_{\text{cpcts}} \cdot (1 - \text{fibra}_{\text{pcts}}/100 - \text{Im}_{\text{pcts}}/100) + m_{\text{fcp}} + m_{\text{imcp}}]/\rho_{\text{cp}} \quad (12)$$

Em que:

v_{cp} = volume do fluxo do caldo prim. [m^3/h];

ρ_{cp} = densidade do caldo prim. [t/m^3];

$\text{fibra}_{\text{pcts}}$ = quantidade de fibra do PCTS [%];

m_{fcp} = fluxo massa fibra caldo prim. [t/h];

m_{imcp} = fluxo de massa de impurezas minerais do caldo prim. [t/h];

Im_{pcts} = impurezas minerais de acordo com as análises do laboratório PCTS.

Para o caldo secundário o balanço de ART é feito através das EQ. (13) e (14), que demonstram as perdas na extração, pois, a moenda não consegue extrair todo o açúcar da cana, e também ocorrem as perdas indeterminadas, onde a sacarose

sofre inversão e até mesmo vazamentos de tubulações do processo (BEM DAL, KOIKE E PASSARINI, 2006)

$$m_{ARTcs} = ART \cdot m_{cpcts} \cdot 1000 \cdot [(E_{et} - E_{ept}) \cdot (1 - P_{ir}/100 - P_L/100) - P_{iest}/100] \quad (13)$$

Onde:

m_{ARTcs} = fluxo massa de ART no caldo secundário [t/h];

E_{et} = eficiência de extração total [%];

P_{iest} = perda indeterminada de massa de ART nos ternos subsequentes.

$$V_{cs} = [(E_{et} - E_{ept}) \cdot m_{cpcts} (1 - \text{fibra}_{pcts}/100 - \text{Im}_{pcts}/100) + m_{fcs} + m_{imcs}] / \rho_{cp} + V_{ae} \quad (14)$$

Em que:

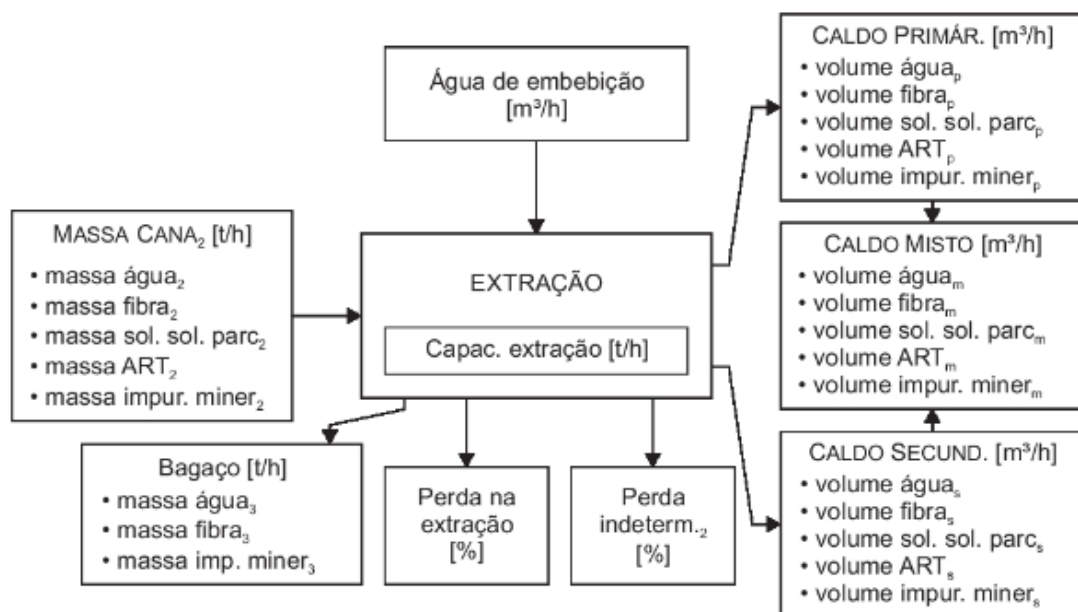
V_{cs} = volume do fluxo caldo secundário. [m³/h];

m_{fcs} = fluxo massa fibra caldo secundário. [t/h];

m_{imcs} = fluxo de massa de impurezas minerais do caldo secundário [t/h].

V_{ae} = vol. fluxo da água de embebição [m³/h];

Figura 19 – Esquema do balanço de ART na extração do caldo de cana



Fonte: BEM DAL, KOIKE E PASSARINI, 2006, p. 37.

Através do balanço de massa da matéria como no esquema da FIG. 18, e de ART representado pelas equações anteriores, a FIG. 19 mostra um esquema onde são aplicadas as equações para o balanço de ART no processo de extração do caldo, assim tornando perceptível a importância desses estudos para poder localizar as perdas e minimiza-las, e também controlar as possíveis variáveis existentes no processo de extração do caldo de cana, para uma melhor eficiência do processo (ROUSSELET, 2011).

7 VARIÁVEIS DE CONTROLE

De acordo com Franchi (2014), o controle de um processo é utilizado para monitorar as variáveis e conservar em um valor desejado, quaisquer que sejam elas, como a temperatura, pressão, vazão, nível e velocidade. Já o controle do processo se justifica pelo fato de reduzir a variabilidade de um produto final, ou, assegurar pela qualidade do processo, assim reduzindo custos para a indústria. Através do controle pode ainda garantir a eficiência do processo, o qual deve operar em uma faixa específica para potencializar sua eficiência, e por último, através do controle das variáveis pode-se promover a segurança dos colaboradores que estão inseridos no processo.

Segundo Franchi (2015), os sistemas de controle atuam na forma de etapas, sendo elas;

1ª – Realizar a medição de um estado ou condição de um processo.

2ª – O controlador vai computar uma ação de acordo com a diferença entre o valor medido com o valor desejado.

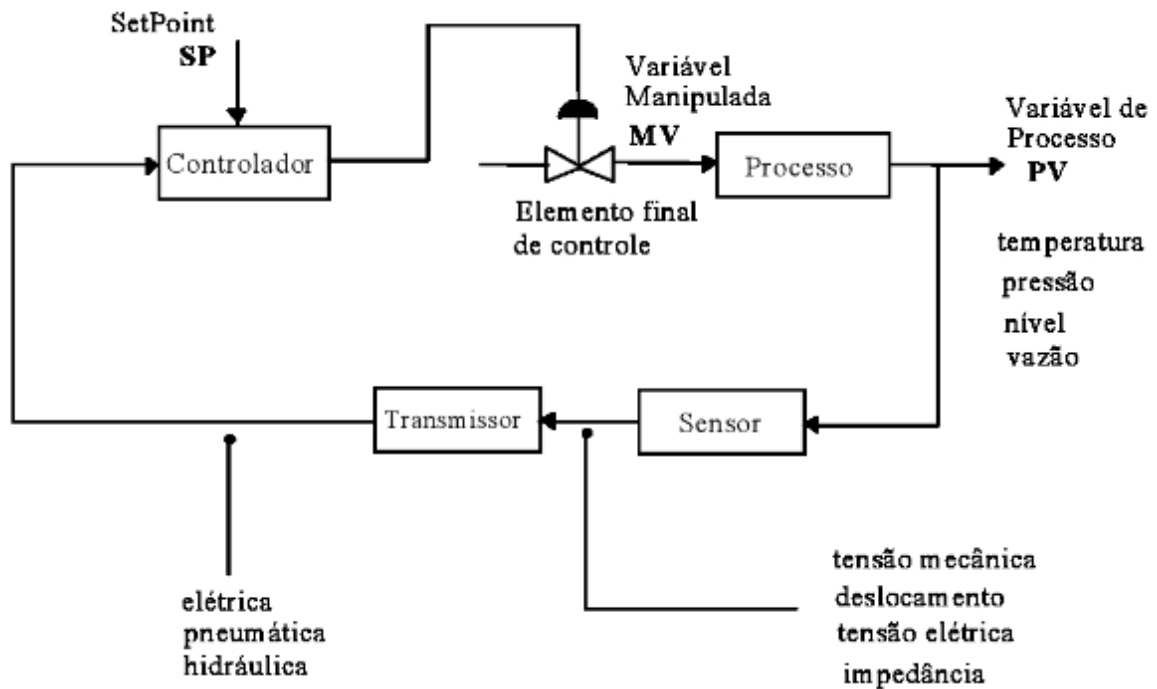
3ª – O sinal de saída, ou seja, o sinal final da computação dos dados vai ser utilizado para manipular uma ação do processo em forma de atuador.

4ª – O processo localizado na variável interpreta o sinal aplicado, alterando-se o seu estado ou condição.

Dentro dos processos industriais há uma gama de profissionais com diferentes conhecimentos técnicos, como engenheiros químicos, engenheiro mecânico, engenheiro elétrico entre outros, desta forma o controle de processo possui seus próprios termos para facilitar o entendimento de todos envolvidos na área (BAYER e ARAUJO, 2011).

A FIG. 20 mostra os principais elementos e seus respectivos termos utilizados em um controle de processos (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2003).

Figura 20 – Elementos e termos em um controle de processos



Fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2003 p.6.

Então a FIG. 20, representa a variável de processo (PV), que é a variável que se deseja controlar, o *setpoint* (SP) o qual representa o valor em que deve conservar a variável de processo, e a variável manipulada (MV) que representa a grandeza que é modificada para conservar a variável no valor do *setpoint*. Mostra também ligado em malha fechada, o transmissor, responsável pela conversão do sinal do sensor em outro tipo de sinal (elétrico, pneumático ou hidráulico) que manda para o controlador, onde é comparado o valor medido ao valor desejado (SP), e então com o sinal apropriado de controle ele altera a MV (FRANCHI, 2015).

Segundo Franchi (2014), existe ainda o erro denominado *offset*, que é a diferença da variável de processo, com o valor do *setpoint*, podendo informar valores positivos ou negativos e, como pode ser visto, o controle de processo tem como objetivo eliminar esse erro. Já em relação ao *offset*, compreendem-se os termos magnitude, que é a variação dentre os valores do *setpoint* e a variável, a duração referenciando-se à condição de um erro em perdurar, e a taxa de variação do erro, que é a relação gráfica entre a magnitude e o tempo de erro.

Ainda existem as terminologias como range, spam, exatidão, rangeabilidade e linearidade, as quais podem ser definidas de acordo com Franchi (2015), como:

- Range: São os limites de medição do equipamento, o limite inferior, e o limite superior;
- Span: É a faixa de alcance de medição do instrumento, do valor mínimo ao máximo, e é encontrado pela subtração do valor máximo pelo valor mínimo;
- Exatidão: É a precisão da medição da variável do seu valor mais próximo do verdadeiro;
- Rangeabilidade: Entende-se que é uma relação entre o valor máximo e o mínimo, percebidos com a mesma exatidão.

No controle de processos, existe o controle manual e automático, no primeiro o operário faz o controle de forma manual, sendo o fechamento de válvulas, dependentes da ação humana. Caso contrário, quando não há interferência humana como no caso de atuadores automáticos de válvula, é considerado sistema de controle automático (FRANCHI, 2015). Para os sistemas de controle existem dois tipos, como a malha aberta e malha fechada, e para representar ambos é utilizado o diagrama de malha de controle. (SENAI – ESPIRITO SANTO E COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO, 1999)

- Diagrama da Malha de Controle: É a representação do sistema de controle através de diagrama de blocos, que mostra o processo, o elemento de medição, o controlador e o elemento final de controle.
- Malha aberta: É um sistema no qual a ação de controle não depende da saída, assim a saída não tem efeito na ação de controle, e como esse sistema não possui realimentação, a saída não tem como parâmetro a entrada, como mostra a FIG. 21.

Figura 21 – Sistema de Controle em malha aberta

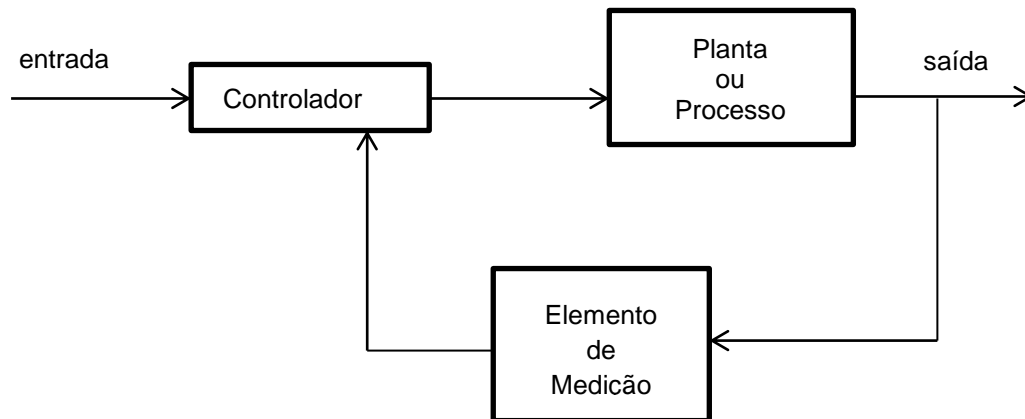


Fonte: SENAI – ESPIRITO SANTO E COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO, 1999, p.12.

- Malha Fechada: Nesse sistema a ação de controle depende de algum jeito da saída, assim, a saída influencia diretamente a ação de controle. A FIG. 22 mostra uma malha fechada, onde pode ser observada a comparação

com a entrada para minimizar o erro e fazer com que a saída permaneça em um valor desejado.

Figura 22 – Sistema de Controle em malha fechada



Fonte: SENAI – ESPIRITO SANTO E COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO, 1999, p.12.

Segundo Rousselet (2011), no controle de processos, existem os diagramas P&I (*Piping and Instrumentation*), que utilizam uma simbologia específica para controle e são fundamentais para a engenharia. Nos diagramas P&I são descritos de forma detalhada projetos de malhas de controle, a instrumentação do processo e suas respectivas funções, como será visto futuramente.

7.1 Variáveis de controle na extração do caldo de cana

Na moagem de cana-de-açúcar existem diversas variáveis de processos que possuem um set-point, ou seja, um valor em que deve ser mantida, ou operam em uma faixa para controlar todo o processo, de modo que o mesmo opere com toda sua capacidade e eficiência de extração, vale ressaltar que os valores, podem variar conforme o processo.

Segundo RIBEIRO (1999), as principais variáveis de processo na moagem são:

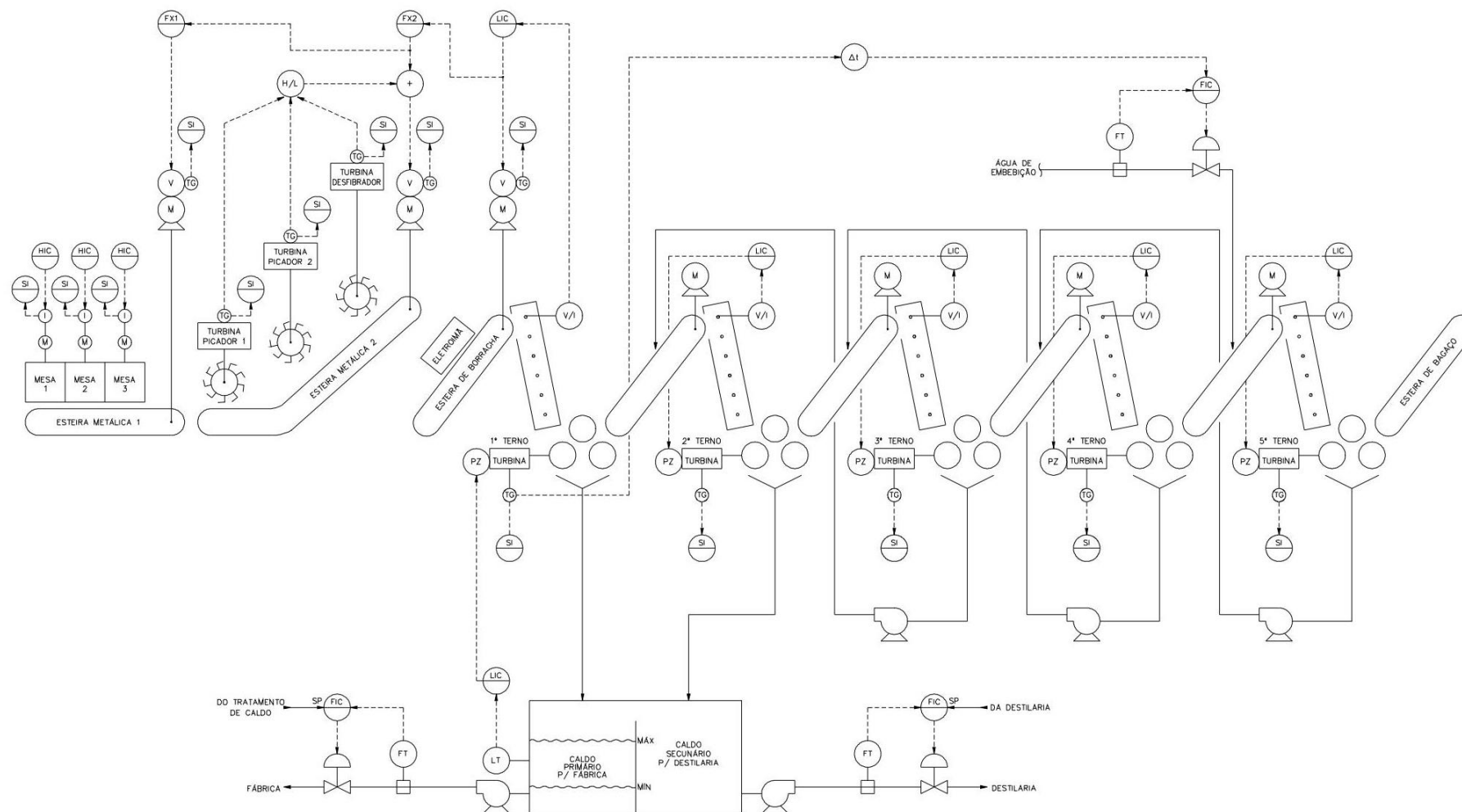
- Velocidade das Turbinas das Moendas;
- Vazão de Água da Embebição;
- Nível da caixa de caldo;
- Divisão do caldo entre destilaria e fábrica de açúcar, e controle das vazões.

Ainda segundo Ribeiro (1999), existem variáveis secundárias na moagem de cana-de-açúcar, que podem ser controladas e também trazem benefícios ao processo, são elas:

- Flutuação do rolo superior dos ternos de moenda;
- Temperatura dos mancais das turbinas, redutores, moendas, picadores, desfibradores, volandeiras e pinhões;
- Temperatura da água de embebição;
- Temperatura do vapor para as turbinas;
- Pressão do vapor para as turbinas;
- Pressão de óleo de lubrificação das turbinas e moendas;
- Rotação das mesas alimentadoras, esteiras e turbinas;
- Umidade do bagaço.

A FIG. 23 mostra detalhadamente o diagrama P&I da etapa onde ocorre a moagem e extração do caldo da cana, etapa primordial para a fabricação do açúcar. Através do diagrama é possível ver números e símbolos que são utilizados internacionalmente para uniformizar a linguagem no controle de processos, sendo a norma ANSI/ISA-S5. 1-1984 "*Instrumentation Symbols and Identification*" é a responsável por regulamentar tal simbologia (ROUSSELET, 2011).

Figura 23 – Diagrama P&I da moagem de cana-de-açúcar



Fonte: RIBEIRO, 1999, p. 36.

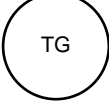
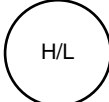
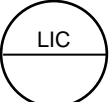
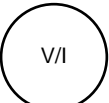
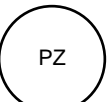
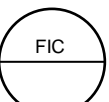
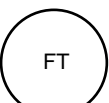
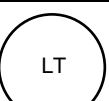
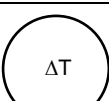
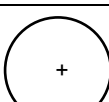


A FIG. 23 apresenta todo o processo de moagem, onde a cana entra pelas mesas alimentadoras é transportada por esteira passando pelos picadores e vai até os ternos de moenda para extração do caldo, onde entra a água de embebição e o caldo é encaminhado para o tanque de caldo, sendo este separado em caldo primário e caldo secundário, além de mostrar as variáveis de controle utilizadas pela instrumentação.

A simbologia apresentada na FIG. 23 pode ser interpretada conforme a TAB. 2.

Tabela 2 – Descrição da simbologia do diagrama P&I na moagem de cana-de açúcar

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
-----	Sinal elétrico
_____	Sinal de impulso ou suprimento
	Indicador, instalado em campo, com um sinal de entrada e um sinal de saída elétrico.
	Chave de Segurança, instalado no painel de controle, acessível ao operador, com sinal de entrada elétrico.
	Controlador indicador manual, instalado no painel de controle, acessível ao operador, com um sinal de saída elétrico.
	Motor, instalado em campo, os sinais de entrada e saída dependem do posicionamento no processo.
	Voltímetro Indicador, acoplado ao moto, instalado em campo, com um sinal de entrada e um de saída elétrico.
	Símbolo não padronizado, neste caso, equipamento a prova de explosões.
	Símbolo não padronizado, neste caso, equipamento a prova de explosões.

Continuação da tabela 2 - Descrição da simbologia do diagrama P&I na moagem de cana-de-açúcar

	<p>Visor de temperatura, instalado em campo, os sinais de entrada e saída depende do posicionamento no processo.</p>
	<p>Indicador de nível. H, nível alto e L nível baixo.</p>
	<p>Controlador indicador de nível, instalado no painel de controle acessível ao operador, com sinal de entrada e saída elétrico.</p>
	<p>Conversor tensão/corrente, instalado em campo, com um sinal de entrada de impulso e um sinal elétrico de saída.</p>
	<p>Elemento final de controle de pressão, instalado em campo, com um sinal de entrada elétrico.</p>
	<p>Controlador indicador de vazão, instalado no painel de controle, acessível ao operador, com dois sinais de entrada e um de saída elétrico.</p>
	<p>Transmissor de vazão, instalado em campo, com um sinal de entrada elétrico, e uma saída de impulso.</p>
	<p>Transmissor de nível, instalado em campo, com um sinal de saída de impulso e um elétrico.</p>
	<p>Variação de temperatura, indicado pelo visor de temperatura, instalado em campo, com um sinal de entrada e um de saída elétrico.</p>
	<p>Medidor de sinal.</p>
	<p>Válvula pneumática, com uma entrada e saída de impulso, e uma entrada elétrica.</p>
	<p>Bomba, com entrada e saída de impulso.</p>

A utilização da instrumentação e o controle de processos na produção de açúcar são fundamentais para a melhoria na qualidade do produto e maior produtividade, colaborando para a competitividade da usina ao mercado, porém, quando o controle das variáveis não é bem empregado, e não opera em conformidade com o processo, são indiscutíveis os danos causados na qualidade e na produtividade (KATO et al., 1997).

7.2 Controle das variáveis

Como visto anteriormente, na moagem de cana-de-açúcar existem diversas variáveis de processo que devem ser controladas, para benefícios como velocidade nas decisões em relação ao processo, comprometimento com o prazo na entrega dos produtos, redução de custos, entre outros (ALCOOLBRAS, 2008).

7.2.1 Controle na alimentação de cana-de-açúcar

Durante a alimentação de cana colhida nas mesas alimentadoras, deve haver o controle de cana ao chegar ao primeiro terno de moenda, bem como a velocidade da esteira de borracha utilizada no transporte e a esteira de metal, que deve ser sincronizada com as demais esteiras. Para evitar acúmulo de cana nos picadores e desfibradores (fase de preparação da cana), e ocasionar embuchamento, nos equipamentos deve haver uma proteção que precisa do controle da rotação das turbinas. Por último o colchão de cana picada e desfibrada onde deve haver um controle de nível, para que as esteiras possuam velocidades diferentes quando sobrecarregadas ou não. (RIBEIRO, 1999).

Segundo Macedo JR (2017), ocorre o controle da rotação das mesas 45° e 32°, com relação do nível, corrente e rotação da esteira metálica.

- Setpoint: 2, 8 mts, 150 A e 8mpm.

Caso o processo opere abaixo dos valores de setpoint, pode ocorrer falha de carga no primeiro de terno, baixa moagem, e risco de bucha nos gamelões por falta

de embebição. Caso contrário, em valores acima do desejado, pode causar bucha nos picadores e desfibradores, e desarme por corrente alta (informação verbal).¹

7.2.2 Velocidade das turbinas das moendas

Segundo Ribeiro (1999), o controle da variável velocidade nas turbinas de moagem é importante pelo fato de afetar diretamente na extração de caldo, pois, em conjunto com a velocidade das turbinas tem-se o controle do nível de cana picada e desfibrada a partir do segundo terno até o último terno de moagem.

Assim, de acordo com Macedo (2017), para o controle da variável de processo como a velocidade da turbina, seguem os critérios:

- Range: 2800 a 5700 rpm (rotações por minuto).
- Setpoint: 3300 rpm

Quando não é controlada perfeitamente ou existem perturbações que interfiram no setpoint, de acordo com Macedo Jr (2017), essa pode causar danos ao processo, sendo elas, abaixo da velocidade desejada ocorre a falta de pressão da bomba de lubrificação mecânica podendo ocorrer o desarme das turbinas, e quando a velocidade está acima do setpoint, ocasiona a perda da qualidade na extração do caldo (informação verbal).²

7.2.3 Vazão de água da embebição

O controle da vazão da água de embebição pode ocorrer de formas diferentes, acompanhando a velocidade da turbina do primeiro terno, chamada então de controle remoto ou também possuir uma vazão fixa com um valor de setpoint local (RIBEIRO, 1999).

Embora tenha os dois tipos de controle da vazão de água da embebição, as usinas possuem um set-point local, que pode ser alterado conforme a umidade e quantidade de cana que está entrando, assim, o controle da vazão pode ser o seguinte:

¹ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

² Ibidem, 2017.

- Range: 0 a 200 m³/h de água
- Setpoint: 150 m³/h de água

Segundo Macedo JR (2017), na instabilidade do controle da vazão, em baixa vazão pode acontecer uma deficiência na extração, e causar perdas de açúcar que ficam retidas no bagaço, induzindo ao embuchamento dos equipamentos, ao contrário, a vazão em valor alto dificulta na evaporação do excesso de água no caldo, pois, o bagaço sai com muita umidade da moagem e conseqüentemente haverá dificuldades na incineração do mesmo nas caldeiras (informação verbal).³

7.2.4 Nível da caixa de caldo

De acordo com Ribeiro (1999), o controle do nível da caixa de caldo, ocorre em junção com a velocidade da turbina do primeiro terno, e tem a função de medir e controlar o nível da caixa de caldo primário agindo sobre a velocidade da turbina.

Conforme Macedo (2017), o nível da caixa de caldo geralmente é controlado da seguinte forma nas usinas:

- Range: 0 a 100%
- Setpoint: 60%

Os danos acarretados pela falta de controle nessa variável ou pelo uso inadequado da automação, pode ser que a caixa de caldo, quando em nível baixo pode causar redemoinho na caixa cônica e a cavitação das bombas, e se chegar ao nível de caldo alto, pode haver o transbordamento de caldo no chão, ou até mesmo na caixa do caldo secundário, ocasionando em futuras perdas de açúcar (informação verbal).⁴

³ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

⁴ Ibidem, 2017.

7.2.5 Divisão do caldo entre destilaria e fábrica de açúcar, e controle das vazões

A vazão do caldo primário para a fabricação de açúcar deve ser controlada, e do mesmo modo para o caldo secundário para a destilaria, esse controle é importante pelo fato de influenciar todo o restante do processo de ambos (RIBEIRO, 1999).

A divisão do caldo ocorre pela necessidade do processo, ou pelo interesse nos produtos por parte da indústria, e segue da seguinte forma:

Fábrica de Açúcar:

- Range: 0 a 1000 m³/h de caldo
- Setpoint: 550 m³/h de caldo

De acordo com Macedo JR (2017), em caso de baixa vazão, pode ocorrer o transbordo de caldo no chão ou na caixa de caldo secundário, e em alta vazão, acontecer redemoinho na caixa cônica e cavitação das bombas, perturbação do decantador e no restante do processo fabril.

Destilaria:

- Range: 0 a 1000 m³/h de caldo
- Setpoint: 140 m³/h de caldo

Os controles da vazão do caldo para a destilaria podem influenciar de forma que em baixa vazão pode acontecer o transbordo de caldo no chão ou no tanque de caldo primário, em alta vazão, também formar redemoinho na caixa cônica e cavitação das bombas, perturbação do decantador e no restante do processo (informação verbal).⁵

7.2.6 Limpeza automática

Segundo Ribeiro (1999), existem no processo, válvulas on-off de vapor ou água quente, para a limpeza da peneira rotativa de caldo, e o controle ocorre em intervalos de tempo. O controle segundo Macedo JR (2017) seguem os valores:

- Setpoint: 5 min de intervalo e 7 min de abertura.

⁵ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

Durante o processo, o comando para abertura das válvulas é enviado pelo operador, posicionado no centro de operações industriais (COI), e caso corra de trabalhar em valor inferior, pode causar a ineficiência na limpeza da peneira, transbordamento de caldo, e ainda influenciar a bucha no pé da esteira de borracha. Em tempo de abertura maior ao setpoint, pode haver grande demanda de água no processo, e atrasar o processo de evaporação (informação verbal).⁶

7.2.7 Comando e intertravamento de motores

As moendas das usinas sucroalcooleiras possuem um sistema de intertravamento de motores da planta, através de comando liga/desliga, usado em casos de emergência por problemas de segurança ou falha no processo (RIBEIRO, 1999).

Geralmente o intertravamento ocorre em todos os equipamentos de moagem, como: esteiras, turbinas dos ternos de moagem, rosca da peneira rotativa, peneira rotativa, bombas dos caldos primário e secundário, tambor espalhador, desfibrador, tambor nivelador, picador, esteira metálica, mesa alimentadora e bombas de embebição (MACEDO JR, 2017, informação verbal).⁷

7.2.8 Flutuação do rolo superior dos ternos de moenda

O Controle da flutuação do rolo superior se faz necessário para uma melhor extração do caldo durante a passagem da cana desfibrada entre os mesmos, segundo Macedo (2017), o controle da variável é realizado conforme os critérios abaixo:

- Range: 0 a 50 mm
- Setpoint: 15 mm

Em caso de variação no valor de set-point, ocorre a deficiência na extração, aquecimento de mancal e quebra da flange (informação verbal).⁸

⁶ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

⁷ Ibidem, 2017.

⁸ Ibidem, 2017.

7.2.9 Temperatura dos equipamentos

É fundamental a informação da temperatura dos equipamentos, sendo eles, os mancais das turbinas, redutores, moendas, picadores, desfibradores, volandeiros e pinhões, geralmente sendo mantidos, em:

- Range: 0 a 100°C
- Setpoint: 48°C

Em caso de temperatura superior ao setpoint pode haver o desgaste do material e até quebra dos mesmos (MACEDO JR, 2017, informação verbal).⁹

7.2.10 Temperatura da água de embebição

Com o controle da vazão de água de embebição é fundamental o controle da temperatura da mesma (RIBEIRO, 1999).

De acordo com Macedo (2017), os valores para controle dessa variável de processos geralmente são:

- Range: 0 a 150°C
- Setpoint: 65°C

E os danos causados no processo pela baixa temperatura é a deficiência na extração, e a alta temperatura ocasiona a “patinação” do bagaço influenciando a formação de buchas (informação verbal).¹⁰

7.2.11 Temperatura do vapor para as turbinas

O vapor para movimentação das turbinas deve ser monitorado e controlado sua temperatura, geralmente as temperaturas envolvidas no controle são:

- Range: 0 a 800°C
- Setpoint: 320°C

De acordo com Macedo (2017), quando a temperatura está abaixo do setpoint pode haver alta condensação do vapor, e arraste de água, e a temperatura além do

⁹ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

¹⁰ Ibidem, 2017.

setpoint, pode ser que ultrapasse a temperatura máxima permitida pelo material (informação verbal).¹¹

7.2.12 Pressão do vapor para as turbinas

De acordo com Franchi (2015), a pressão é uma variável relevante no processo, sendo empregada para medir demais variáveis ou também ser utilizada para maior segurança do processo, no caso de bloqueio dos equipamentos em uma circunstância.

O controle da pressão para as turbinas segue os parâmetros:

- Range: 0 a 30 kgf
- Setpoint: 21 kgf

Quando a pressão é inferior ao setpoint, ocorre a perda de força da turbina e ocorre o desarmamento da moenda, em caso contrário, com a pressão muito alta, a válvula de segurança abre, e ocorre o desarmamento da moenda devido a alta pressão (informação verbal).¹²

7.2.13 Pressão de óleo de lubrificação das turbinas e moendas

O controle da pressão de óleo de lubrificação é uma variável auxiliar do processo, e pode ser contida da forma:

- Range: 0 a 15 kgf
- Setpoint: 8 kgf

Quando a pressão não alcança o valor recomendado, há uma deficiência na lubrificação dos mancais, falha na atuação da válvula de vapor e em caso extremo o desarme da turbina, acima do setpoint, ocorre o rompimento das tubulações e retentores, podendo haver o desarme da turbina também (informação verbal).¹³

¹¹ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

¹² Ibidem, 2017.

¹³ Ibidem, 2017.

7.2.14 Medição de rotação das mesas alimentadoras, esteiras e turbinas

Ainda de acordo com Macedo JR (2017), a rotação da mesa alimentadora, esteiras e turbinas seguem os parâmetros:

- Média de rotação:
 - Mesa alimentadora: 2,8 mts;
 - Esteira metálica: 0 a 12 mpm;
 - 1º Terno: 480 a 1080;
 - 2º Terno: 3500 a 5700;
 - 3º Terno: 2800 a 5700;
 - 4º Terno: 2800 a 5700;
 - 5º Terno: 2800 a 5700;
 - 6º Terno: 3500 a 5700;

O controle da medição de rotação não possui um setpoint específico, sendo que as rotações dos equipamentos podem variar conforme a quantidade de cana de entrada, entre outros fatores que podem influenciar na rotação (informação verbal).¹⁴

7.2.15 Medição de umidade do bagaço

O controle da umidade do bagaço que sai da moagem é recolhido através de amostrador e analisado pelo laboratório, os resultados obtidos são analisados estão em conformidade com os parâmetros:

- Range: 47% a 52%
- Setpoint: 49%

Em caso da umidade ser inferior, quantifica-se a possibilidade de açúcar no mesmo, se baixo valor, o processo está eficiente. Com a umidade alta, influencia no processo de combustão e controle da queima nas caldeiras (MACEDO JR, 2017, informação verbal).¹⁵

Segundo Torres (2014), por mais que o processo de produção esteja controlado, a todo o momento pode haver variações derivadas de motivos aleatórios,

¹⁴ MACEDO JR. N. A. Técnico em instrumentação e automação, graduando em engenharia da computação, coordenador de instrumentação na Biosev S. A., unidade de Lagoa da Prata-MG, em entrevista, 20 de Setembro de 2017.

¹⁵ Ibidem, 2017.

e em caso deste sofrer alterações de causas comuns, a oscilação do processo se manterá em faixa estável, sendo aplicado então, ao controle estatístico.

8 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP)

É comum nos processos industriais, a aplicação do controle estatístico do processo (CEP), cuja função é reduzir as possíveis variações do processo, influenciando positivamente, na produção, na confiabilidade e no custo do produto. Essa ferramenta estatística baseia-se em amostragens feitas ao decorrer do processo para identificar as causas aleatórias que podem causar danos no mesmo, ou ao produto (RIBEIRO; CATEN, 2012).

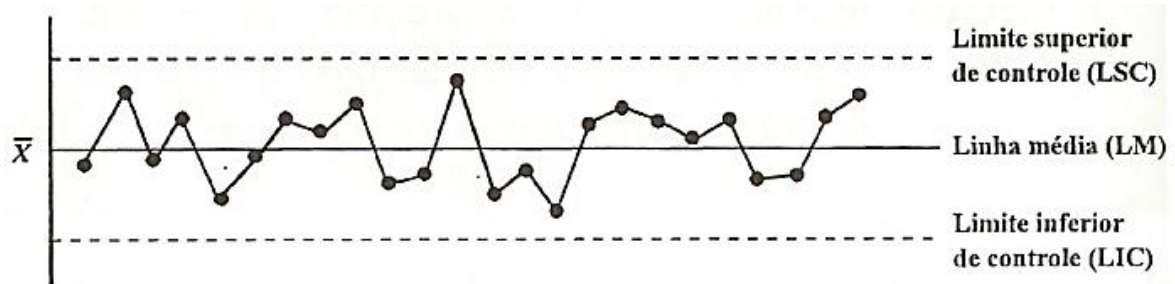
Segundo Sagawa e Yamada (2013), o CEP possui diversas ferramentas que podem auxiliar a aplicar o controle em qualquer tipo de processo, sendo elas: histogramas ou ramo-e-folhas, folha de controle, gráfico de controle, entre outras.

8.1 Gráficos de controle

Os gráficos de controle são métodos de estudos para minimizar a variabilidade do processo em função do tempo, e chama atenção para causas especiais grandes no fluxo do processo. Tal ferramenta estatística é utilizada para presumir parâmetros de controle, e através dessa análise, determinar a capacidade do processo. Vale ressaltar que o gráfico de controle indicará as causas especiais, a ação de correção e eliminação, devendo partir da gerência ou do responsável pelo processo (SANTOS; MARTINEZ; SARTORI, 2010).

Segundo Oliveira e Lima (2010), para a interpretação do gráfico de controle, deve-se saber que o gráfico mostra três linhas, considerando a mais alta o Limite Superior de Controle (LSC), a Linha Média (LM) e a mais baixa, o Limite Inferior de Controle (LIC). Como mostrado na FIG. 24, quando os dados obtidos são plotados no gráfico e os pontos passam dos LSC e LIC, interpreta-se que o processo está fora de controle, porém, existem mais critérios a serem analisados, para determinar a não conformidade. Cita-se como exemplo o fatos de os pontos estarem entre os limites, porem estão dispostos de forma sistematizada, o processo pode estar também fora de controle, sendo caracterizada a aleatoriedade dos pontos um processo demonstrando que está sob controle.

Figura 24 – Modelo de um gráfico de controle



Fonte: MUCIDAS, 2010, p. 30,

8.2 Capacidade do processo

De acordo com Sagawa e Yamada (2013), o estudo da capacidade do processo é primordial para melhor desempenho e qualidade do mesmo. Através das informações obtidas, pode-se analisar se o processo mantém na tolerância, e auxiliar os responsáveis pelo mesmo nas alterações necessárias, estimarem especificações para um novo equipamento, minimizar as variações, entre outros fatores.

As informações da capacidade do processo ocorrem através de cálculos que resultam na capacidade de um processo expressos pelos índices de C_p , (EQ. 15) C_{pk} (EQ. 16) e C_{pm} (EQ. 17) (MUCIDAS, 2010).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (5)$$

Onde:

C_p = índice de capacidade do processo;

LSE = Limite superior de especificação;

LIE = Limite inferior de especificação;

σ = desvio padrão.

$$C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\} \quad (6)$$

Em que:

C_{pk} = índice de desempenho do processo;

μ = média.

$$Cpm = \frac{LSE - LSI}{6\sqrt{\sigma^2 + (d + \mu)^2}} \quad (7)$$

Onde:

Cpm = índice de unidades não-conformes.

Ainda de acordo com Mucidas (2010), o índice Cp , está relacionado com as variações que existem no processo, e com as variações em que o mesmo pode estar submetido, o índice Cpk , relaciona a centralização do processo e informa se o processo atende as especificações, através das medições da capacidade real do processo, e o índice Cpm , em valor inadequado quando o processo apresenta produtos com não-conformidades, e estes estejam em proporções iguais, resultando em valores diferentes para esse índice.

Segundo Oliveira e Lima (2010), os valores obtidos por Cpk podem influenciar nas ações de controle do processo, a TAB. 3, mostra as interpretações para os valores desse índice.

Tabela 3 – Interpretações para os valores de Cpk

Cpk	Interpretação	Ações pertinentes
$Cpk \geq 2,0$	Processo excelente, altamente confiável	Os operadores têm perfeito controle do processo
$1,33 \leq Cpk \leq 2,0$	Processo capaz, relativamente confiável	Os operadores têm que monitorar para evitar deterioração
$1,00 \leq Cpk \leq 1,3$	Processo relativamente incapaz, pouco confiável	Exige dos operadores controle contínuo
$0 \leq Cpk \leq 1,0$	Processo incapaz, podemos ter produção defeituosa	Exige dos operadores controle de 100% da produção
$Cpk \leq 0$	Processo totalmente incapaz, não tem condições de manter as especificações.	

Fonte: SAGAWA e YAMADA, 2013, p. 6.

8.3O CEP na moagem de cana-de-açúcar

De acordo com o software Minitab® 18 (2017), os limites de especificações são a faixa de valores, em que os serviços devem operar, como as variáveis de controle, e é estipulado pelos responsáveis pelo processo. A TAB. 4 mostra as principais variáveis no processo de extração ou moagem da cana-de-açúcar, com os limites

inferiores de especificação (LIE), limites superiores de especificação (LSE), e o valor alvo em que devem ser mantidas para o controle do CEP.

Tabela 4 – Esboço das variáveis controladas pelo CEP

Etapa	Variável	Valor alvo	Limite inferior de especificação (LIE)	Limite superior de especificação (LSE)
Extração	Velocidade das turbinas das moendas (rpm)	3300	2800	5700
Extração	Vazão de água da embebição (m ³ /h)	150	0	200
Extração	Nível da caixa de caldo (%)	60	0	100
Extração	Vazão de caldo para destilaria (m ³ /h)	550	0	1000
Extração	Vazão de caldo para fábrica de açúcar (m ³ /h)	140	0	1000
Extração	Flutuação do rolo superior dos ternos de moenda (mm)	15	0	50
	Temperatura dos equipamentos (°C)	48	0	100
Extração	Temperatura da água de embebição (°C)	65	0	150
Extração	Temperatura do vapor para as turbinas (°C)	320	0	800
Extração	Pressão do vapor para as turbinas (kgf)	21	0	30
Extração	Pressão de óleo de lubrificação das turbinas e moendas (kgf)	8	0	15
Extração	Umidade do bagaço (%)	49	47	52

Fonte: Morais, P. C. 2017.

Segundo Payne (2010), um controle químico na moagem da cana é fundamental para a qualidade da extração e acompanhamento do processo para melhoria contínua na eficiência da extração.

9 CONTROLE QUÍMICO DA MOAGEM

Durante o processo de extração da sacarose, são realizados diversos testes de controle, para o acompanhamento da eficiência do processo, sendo apresentados por Payne (2010), os principais controles nas etapas de:

- Cana preparada;
- Cana inteira;
- Caldo primário;
- Caldo absoluto;
- Caldo do último terno;
- Caldo filtrado;
- Caldo misto;
- Bagaço;

Embora sejam necessários todos esses controles, seria inviável para as usinas fazê-los, pela grande demanda de mão-de-obra, ou mesmo espaços físicos dos laboratórios, assim, geralmente nas usinas do Brasil, as principais análises de controle são do caldo primário, caldo misto e bagaço (BIOSEV, 2016).

9.1 Caldo primário

Ainda de acordo com Payne (2010), o caldo que sai do primeiro terno de moagem é analisado para determinação de °Brix, pol e pH a fim de quantificar o teor de sacarose presente no mesmo.

Os parâmetros de acordo com a Biosev (2016) são:

- Brix: 8,0 a 20,0.
- Pol: 7,0 a 15,0°Z.
- pH: 4,0 a 6,0.

9.2 Caldo misto

O caldo misto, é a mistura entre o caldo secundário e primário, as análises feitas são em relação a pol, °Brix e pureza. (PAYNE, 2010).

Os parâmetros seguidos pela Biosev (2016) são:

- Brix: 8,0 a 20,0.
- Pol: 7,5 15,0 °Z.
- Pureza: >70%.

9.3 Bagaço

É feita a amostragem em intervalo de tempo, onde o bagaço transportado pela esteira, que sai dos ternos de moenda, cai em uma gaveta, fazendo uma compostagem no período de 4 horas, na amostra coletada, são realizadas análises de pol, umidade, fibra e °Brix do extrato (PAYNE, 2010).

A biosev (2016) seguem os parâmetros a seguir:

- Pol: <2,00 °Z.
- Umidade: <55,0%.
- Fibra: <55,0%
- Brix do extrato: <4,0.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a revisão bibliográfica, foi possível notar a importância do açúcar para o homem, o qual está presente na alimentação diária do mesmo, na sua forma mais pura ou nos alimentos. O desenvolvimento das usinas fez com que o produto tornasse cada vez mais barato, devido a maior produção em um menor tempo, e um dos fatores que influenciou ao desenvolvimento, foi o controle de processos, técnicas que, se bem alinhada, garantem uma boa eficiência do sistema.

Para um bom controle do processo, se faz necessário conhecer o mesmo de forma mais detalhada possível, e entender os produtos que são gerados no mesmo, de forma qualitativa e quantitativa. Apropriado desse conhecimento, e compreendendo todas as variáveis de processo, é possível estimar valores em que as mesmas devem permanecer, para que o processo opere com maior eficiência em conformidade com os parâmetros de qualidade. Desta forma, o presente trabalho abordou as variáveis de processo presentes na moagem de cana-de-açúcar, e de acordo com pesquisas bibliográficas e em campo, estimou valores em que o processo de moagem deve permanecer, para manter-se com alta produção, qualidade, e sem perdas. É perceptível ver a importância do controle, pois, se fora do mesmo, os danos ao processo são visíveis e podem tomar grandes proporções, desde um simples embuchamento nos ternos de moagem, até o desarmamento da moenda.

Interligado com o controle de processo, está a estatística, poderosa ferramenta que bem alinhada ao mesmo é fundamental para um rendimento do processo. O trabalho aborda a importância do controle estatístico de processo (CEP), e como este pode controlar as variáveis do mesmo, e através dos resultados obtidos, influenciar nas decisões de operação da moagem de cana-de-açúcar. Vinculado ao controle das variáveis de processo, e o CEP, não pode faltar o controle químico, fator primordial e diretamente ligado a qualidade do processo, e aos produtos. Através dos estudos realizados, foi possível perceber que são feitas análises em pontos estratégicos do processo, os quais, se estiverem fora dos parâmetros, necessita-se de interferência imediata da gerência, ou do responsável pelo processo.

As indústrias açucareiras estão em busca constante pelo controle de processo eficaz, por isso a implantação de sistemas que melhoram a eficiência de

extração do caldo estão sendo cada vez mais buscadas, por exemplo, sistemas de moagem por difusores, que garantem uma maior extração do caldo, ou seja, perda mínima de matéria-prima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOOLBRAS. **A usina interligada**. São Paulo: Valete Editora Técnica Comercial Ltda, ano XI, n. 118, 2008. Disponível em: <<http://www.revistaalcoholbras.com.br/>>. Acesso em: 18 set. 2017.

ALMEIDA, J. C.; **A Indústria Sucroalcooleira - energética e os Recursos Hídricos: Rio Santo Antônio Grande, Alagoas**. 2009. 90 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas-UFAL, Maceió, 2009.

BAYER, F. M., ARAÚJO, O. C. B. **Controle Automático de Processos**. Colégio Técnico Industrial – UFSM, Campus Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

BEM DAL, A.J.; KOIKE, G. H. A.; PASSARINI, L. C. **Modelagem e simulação para o processo industrial de fabricação de açúcar e álcool**. Pesquisa e Tecnologia Minerva, São Paulo, v.3, n. 1, p. 33-46, jan. 2006.

Biosev S. A. **Plano de qualidade de materiais em processo**, 2016, Lagoa da Prata- MG.

CASTRO, H. F. **Indústria Açucareira**. Processos Químicos Industriais II. 2011. 20 p. Apostila – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de Lorena – EEL, São Paulo, 2011.

CHEMELLO, E. **Química na Cozinha: O Açúcar**. Revista Eletrônica ZOOM da Editora Cia da Escola, São Paulo, Ano 6, n. 4, p. 1-30, 2005. Disponível em: <http://www.quimica.net/emiliano/artigos/2005nov_qnc_sugar.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Monitoramento agrícola-safra 2015/2016. Brasília, v. 2, n. 3, p. 1-65, 2015.

COUTEUR, P. L.; BURRESON, J. **Os botões de Napoleão: As 17 moléculas que mudaram a história** (2003); tradução Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Zahar, 2006.

DOCE AROMA, ADITIVOS E INGREDIENTES, **As múltiplas aplicações do açúcar**. São Paulo, p. 47-56, [200-].

FELDER, R. M., ROUSSEAU, R. W. **Princípios Elementares dos Processos Químicos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FERNANDES, K. G.; ALMEIDA, Z. Z. S. **Processo de Fabricação do Açúcar Cristal**. 2011. 41 p. Trabalho Acadêmico (Curso de Engenharia Química)- Universidade Federal do Maranhão-UFMA, São Luís, 2011.

FRANCHI, C.M. **Instrumentação de Processos Industriais**. 2015. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2015.

FRANCHI, C. M. **Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações**. 2014. 1ª ed. São Paulo: Érica Ltda, 2014.

FRANCISCO JUNIOR, E. W. **Carboidratos: Estrutura, Propriedades e Funções**. Química nova na escola. [S.l.], n. 29, ago. 2008.

GONÇALVES FILHO, M., BARROS, M.J., CAMPOS F.C. **Sustentabilidade no processo de recepção da cana de açúcar em usina sucroalcooleira**. International workshop advances in clear production. São Paulo, p. 1-9, 2015.

HAMERSKI, F. **Estudo de Variáveis no Processo de Carbonatação do Caldo de Cana-de-açúcar**. 2009. 141 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Tecnologia de Alimentos)-Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba, 2009.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Volume 1. São Paulo: Mestre Jou, 1969.

KATO, E. R. R. et al. **A simulação no apoio da implantação de instrumentação e automação no setor de álcool e açúcar**. In: Encontro nacional de engenharia de produção – ENEGEP, p.8, 1997, Gramado-RS. Anais: UFRGS-PPGEP, 1997. CD-ROOM.

LIEBERG, V. **A influência do estoque mundial do açúcar sobre o preço internacional dessa commodity**. 2014. 75 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Economia e Gestão do Agronegócio)- Fundação Getúlio Vargas – Escola de Economia de São Paulo- FGV/EESP, São Paulo, 2014.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da Fabricação de Açúcar**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Inhumas, Goiás, 2012.

MANOCHIO, C. **Produção de Bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos**. 2014. 32 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Produção Brasileira de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol**. Disponível em:< <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/producao-brasileira-de-cana-de-acucar-acucar-e-etanol.pdf/view>> . Acesso em 05 de jun.2017.

MINITAB® 18. **Recursos Didáticos**. Disponível em:< <http://www.minitab.com/pt-br/academic/k-12/>>. Acesso em 18 Set. 2017.

MUCIDAS J.H. **aplicação do controle estatístico do processo no envase de leite uht em uma indústria de laticínios**. 2010. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, 2010.

OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK, Paris: **OECD Publishing**, Paris, v. 12.2016. Disponível em: < <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/5116021e.pdf?expires=1492803512&id=id&accname=guest&checksum=BDB639B6EF9AD37C3A71508AC25CFB52>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

OLIVEIRA, T. S; LIMA, R.H.P. **Aplicação do controle estatístico de processo na mensuração da variabilidade em uma usina de etanol**. In: Encontro nacional de engenharia de produção, 30, 2010, São Carlos. **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2010. Disponível em:<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_125_805_15024.pdf> Acesso em 18 Set. 2017.

PAYNE, J.H. **Operações Unitárias na produção de açúcar de cana**. 2ª ed. São Paulo: Nobel: STAB, 2010.

RAMPAZZO, V. **Usina de Açúcar e Etanol Santa Terezinha**. 2014. 22 p. Estágio Supervisionado (Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

RIBEIRO, C. A. F; BLUMER, S. A. G; HORII, J. **Tecnologia do açúcar: 1ª Parte**. Fundamentos da tecnologia sucroalcooleira. 1999. 67. Apostila acadêmica (Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999. Disponível em:<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4053772/mod_resource/content/1/Apostila%20de%20tecnologia%20do%20a%C3%A7%C3%BAcar.pdf> . Acesso em 02 Jun 2017.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, Ct. S.; **Série Mono gráfica Qualidade: Controle Estatístico do Processo**. FEENG/UFRGS – Fundação Empresa Escola de Engenharia da UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, RS. 2012.

Ribeiro, P.R. **Curso sequencial de automação para indústria sucroalcooleira: Apostila de treinamento módulo II**. [20--]. 113 p. Curso de Automação- Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Sertãozinho, 1999.

RODRIGUES, L. D. **Cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. 2010. 59 p. Trabalho de conclusão de curso (Especialista em Análise Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

ROSA, M. A. C. **Produção de Bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos**. 2005. 182 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ROUSSELET, G. R. **Análise da evolução do sistema de automação no processo de produção de etanol – estudo de caso**. 2011. 120 p. Tese de Doutorado (Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2011.

RUMÁNKOVÁ, L.; N SMUTKA, L. **Global sugar Market** – the analysis of factors influencing supply and demand. Acta Universitatis Agriculturae Et Sivilculturae Mendelianae Brunensis, volume LXI, n. 2, p. 463-47, 2013.

SAGAWA, J. K; YAMADA, R. I. **Aplicação de ferramentas de controle estatístico da qualidade ao monitoramento da produção de etanol**. In: Encontro nacional de engenharia de produção, 33, 2013, Salvador. **Anais...**Salvador: ABEPRO, 2013. Disponível em:<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_177_007_23157.pdf> Acesso em 18 Set. 2017.

SANTOS, L. C; MARTINEZ, J. C; SARTORI, M. M. **Controle estatístico do processo de filtração da torta de filtro e análise da quantidade de açúcar perdido**. In: Sinape, 19, 2010, São Paulo: UNESP, 2010. Disponível em:<<http://www.ime.unicamp.br/sinape/19sinape/node/910>> Acesso em 18 Set. 2017.

SAÚDE-IG. **Mascavo, demerara e mais**: tipos, benefícios e calorias do açúcar. Disponível em: <<http://saude.ig.com.br/alimentacao/dossie-do-acucar/n1238113784817.html>>. Acesso em 02 jun. 2017.

SENAI – ESPIRITO SANTO E COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO. **Instrumentação**: Fundamentos de Controle de Processos, Vitória, Espírito Santo, 1999.

SHREVE, R. N.; BRINK, J. A. J. **Indústrias de Processos Químicos**. 4. ed. atual. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SILVA, B. R. et al. **Aplicação da produção mais limpa no processo de clarificação do caldo de cana para produção de açúcar**. XXVII Encontro nacional de engenharia de produção, Rio de Janeiro, p. 1-13, 2008.

SILVA, M. R.R. **Quantificação da produção de açúcar, álcool e energia excedente em uma usina sucroalcooleira através da ferramenta quantifica**. 2013. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

TERRON, L.R. **Operações Unitárias**: Para químicos, farmacêuticos e engenheiros. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC,2012.

THE SUGAR ASSOCIATION. Publicações. **How well do you know sugar?**. Disponível em:< <https://www.sugar.org/wp-content/uploads/2013/11/How-well-do-you-know-sugar.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

TORRES, L. S. **Controle estatístico de processo aplicado ao monitoramento de perdas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. 2014. 59 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Departamento de Engenharia da Computação e Automação. **Sistemas de Controle I**. Natal – RN, 2003.

VOLLHARDT, K.P.C.; SCHORE N.E. **Química Orgânica: Estrutura e Função**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.