

Coleção UAB–UFSCar

Tecnologia Sucroalcooleira

Química do processamento sucroalcooleiro

Cláudio Hartkopf Lopes

Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges

Controle químico do processamento sucroalcooleiro



Controle químico do processamento sucroalcooleiro



Reitor

Targino de Araújo Filho

Vice-Reitor

Pedro Manoel Galetti Junior

Pró-Reitora de Graduação

Emília Freitas de Lima



Secretária de Educação a Distância - SEaD

Aline Maria de Medeiros Rodrigues Reali

Coordenação UAB-UFSCar

Claudia Raimundo Reyes

Daniel Mill

Denise Abreu-e-Lima

Joice Lee Otsuka

Marcia Rozenfeld G. de Oliveira

Sandra Abib

**Coordenadora do Curso de
Tecnologia Sucroalcooleira**

Miguel Antonio Bueno da Costa

UAB-UFSCar

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235

13565-905 - São Carlos, SP, Brasil

Telefax (16) 3351-8420

www.uab.ufscar.br

uab@ufscar.br

Cláudio Hartkopf Lopes
Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges

Controle químico do processamento sucroalcooleiro

São Carlos
2011

Concepção Pedagógica

Daniel Mill

Supervisão

Douglas Henrique Perez Pino

Equipe de Revisão Linguística

Ana Luiza Menezes Baldin

Clarissa Neves Conti

Daniela Silva Guanais Costa

Francimeire Leme Coelho

Jorge Ialanji Filholini

Letícia Moreira Clares

Luciana Rugoni Sousa

Paula Sayuri Yanagiwara

Sara Naime Vidal Vital

Equipe de Editoração Eletrônica

Christhiano Henrique Menezes de Ávila Peres

Izís Cavalcanti

Rodrigo Rosalis da Silva

Equipe de Ilustração

Eid Buzalaf

Jorge Luís Alves de Oliveira

Lígia Borba Cerqueira de Oliveira

Priscila Martins de Alexandre

Capa e Projeto Gráfico

Luís Gustavo Sousa Sguissardi

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	11
---------------------------	----

UNIDADE 1: Aspectos gerais do controle químico

1.1 Introdução	15
1.2 Controle do processo industrial	15
1.3 Laboratório industrial	16
1.4 Boletins de controle	16
1.5 Processo tecnológico	18
1.6 Balanço de massa	19
1.7 Estequiometria	20
1.8 Balanço de massa de uma usina de açúcar	22

UNIDADE 2: Controle da cana para fins de pagamento pela qualidade

2.1 Introdução	27
2.2 Sistema de pagamento da cana pelo teor de sacarose e qualidade (PCTS)	27
2.3 Entrega e amostragem das cargas	28
2.4 Sonda amostradora	30
2.5 Amostragem das cargas	31

2.6 Tratamento da amostra	31
2.7 Laboratório de análise de cana	32
2.8 Procedimentos analíticos	32
2.9 Cálculos dos resultados	34
2.10 Açúcares totais recuperáveis	37
2.11 Espectrofotometria do Infravermelho Próximo	37
2.12 Informação dos dados obtidos	38
Anexo 1	39
Anexo 2	40

UNIDADE 3: Amostragem

3.1 Introdução	45
3.2 Coleta e composição da amostra	45
3.3 Amostra	45
3.4 Água de lavagem de cana	45
3.5 Cana-de-açúcar desfibrada	46
3.6 Bagaço	46
3.7 Caldos	47
3.8 Torta do filtro	48
3.9 Xarope, massa e méis	49

3.10 Açúcar	49
3.11 Mosto e vinho	50
3.12 Pé de cuba	50
3.13 Vinho centrifugado e leite de levedura.....	50
3.14 Vinhaça e flegmaça	51
3.15 Alcoóis	51
3.16 Amostragem e análise de outros materiais.....	51

UNIDADE 4: Balanço de massa e controle de processo I

4.1 Introdução	55
4.2 Lavagem de cana	55
4.3 Extração do caldo.....	56
4.4 Tratamento do caldo	61

UNIDADE 5: Balanço de massa e controle de processo II

5.1 Aspectos iniciais.....	69
5.2 Aquecimento e controle do caldo clarificado	69
5.3 Evaporação.....	69
5.4 Cristalização da sacarose	73
5.5 Rendimento de uma usina com destilaria.....	78

UNIDADE 6: Açúcar e álcool – classificação

6.1 Açúcar.....	83
6.2 Álcool	84
6.2.1 Classificação do etanol.....	85
6.2.2 Especificações	86
6.2.2.1 Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC).....	86
6.2.2.2 Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC)	88
6.2.2.3 Álcool Etílico Anidro Industrial (AEAI).....	89
6.2.2.4 Álcool Etílico Hidratado Industrial (AEHI)	90
6.2.2.5 Álcool Etílico Refinado	91
6.2.3 Itens de especificações	93
6.2.3.1 Acidez	93
6.2.3.2 Alcoóis superiores	93
6.2.3.3 Álcool metílico (metanol)	94
6.2.3.4 Aldeídos	94
6.2.3.5 Acetal	94
6.2.3.6 Ânions.....	95
6.2.3.7 Aspecto.....	95
6.2.3.8 Barbet	95
6.2.3.9 Benzeno	95
6.2.3.10 Condutividade elétrica.....	96
6.2.3.11 Ésteres	96
6.2.3.12 Massa específica, densidade e teor alcoólico	96
6.2.3.13 Materiais não voláteis ou extrato seco.....	97
6.2.3.14 Metais.....	97
6.2.3.15 Odor	98
6.2.3.16 Potencial de hidrogênio (pH)	98
6.3 Classificação do açúcar	98
6.4 Polarização do açúcar.....	98
6.5 Umidade (perda de peso por secagem)	99

6.6 Cor Icumsa	99
6.7 Cinzas condutimétricas.....	99
6.8 Açúcares redutores	100
6.9 Resíduo insolúvel.....	100
6.10 Partículas magnetizáveis.....	101
6.11 Dióxido de enxofre	101
6.12 Amido	101
6.13 Dextrana	102
6.14 Granulometria	103
6.15 Presença de metais	103
6.16 Metodologia analítica.....	104

UNIDADE 7: Balanço energético I

7.1 Introdução	107
7.2 Demanda energética na produção de álcool.....	107
7.3 Circuito térmico de uma usina.....	109
7.4 Produção de bagaço de cana.....	110
7.5 Composição do bagaço de cana	111
7.6 Poder calorífico do bagaço de cana	111
7.7 Queima do bagaço e caldeira.....	113

7.8	Balço de energia de uma caldeira	114
7.9	Cálculo da eficiência pelo método indireto ou das perdas	115
7.10	Geração de energia mecânica	118
7.11	Consumo específico de uma turbina	119

UNIDADE 8: Balço energético II

8.1	Introdução	125
8.2	Demanda de vapor direto no preparo da cana	125
8.3	Demanda de vapor na moagem	127
8.4	Consumo de energia elétrica numa usina convencional	128
8.5	Demanda de vapor de escape	130
8.6	Balço energético global	133

REFERÊNCIAS	137
--------------------	-----------	-----

APRESENTAÇÃO

A industrialização da cana-de-açúcar tem por objetivo a produção do mais universal dos alimentos doces, a sacarose cristalizada, e de um importante combustível automotivo, o etanol. A rentabilidade do processamento da cana, seja para a produção de açúcar ou de álcool, está relacionada com a eficiência na recuperação da sacarose e com a qualidade do produto gerado.

Com o pensamento voltado para esses aspectos, procuramos nesta publicação abordar os tópicos de controle químico do processo de fabricação de açúcar e álcool e todos os aspectos a ele correlacionados.

Inicialmente, tratamos do controle químico de maneira geral, descrevendo como ele é realizado nas usinas e destilarias de nosso país. Damos ênfase aos boletins de controle de processo, apresentando especialmente os procedimentos matemáticos utilizados para os cálculos dos diferentes itens neles contidos e o seu preenchimento.

Em seguida apresentamos uma visão geral sobre os materiais em processamento amostrados, bem como o procedimento da coleta de amostra para que esta atenda às necessidades de representatividade exigidas pelo controle químico.

Em sequência tratamos do sistema de pagamento da cana pelo teor de sacarose (PCTS) e os cálculos e procedimentos químicos adotados.

Finalizamos com um estudo dos cálculos de balanço de massa e de energia necessários para o controle e otimização de uma usina ou destilaria.

O nosso objetivo foi tornar esta publicação um instrumento que complemente os temas “Fabricação de açúcar” e “Fabricação de álcool”, sendo útil para os alunos, profissionais e interessados no setor agroindustrial sucroalcooleiro.

UNIDADE 1

Aspectos gerais do controle químico

1.1 Introdução

Uma indústria é um empreendimento que tem como principal objetivo apresentar um retorno financeiro compatível com o capital mobilizado. Isso significa que ela tem que ser rentável. A rentabilidade de uma indústria está relacionada com sua eficiência e com a qualidade de seu produto. A situação ideal é uma indústria otimizada, ou seja, com uma alta produtividade e qualidade do produto aliada a um baixo custo de produção.

Para que se tenha uma indústria otimizada é necessário que se conheça os parâmetros tecnológicos e as eficiências das diversas operações que compõem o seu fluxograma industrial. Assim, pode-se construir um histórico do comportamento da empresa, o que permite um planejamento futuro. Também o conhecimento das eficiências das operações e das características dos diversos materiais em processamento permite uma rápida identificação de qualquer anormalidade e sua rápida correção.

1.2 Controle do processo industrial

O controle químico do processo de fabricação de açúcar e álcool é realizado por meio de análises laboratoriais de amostras da matéria-prima, dos insumos, do material em processamento, dos produtos finais e dos efluentes e resíduos industriais. Os resultados da análise desse material coletado são utilizados para os cálculos que nos permitem estimar as perdas, eficiências e a qualidade do material em questão ou das operações unitárias do processo.

Assim, o conjunto de operações que engloba a coleta de amostra, a análise laboratorial, os cálculos de balanço de massa e a interpretação dos resultados é denominado genericamente de controle químico do processo.

Resumindo, pode-se concluir que os objetivos do controle químico são:

1. Determinar a eficiência de cada uma das etapas do processo, proporcionando dados atualizados para os operadores da fábrica.
2. Determinar as perdas materiais do processo por meio de balanços materiais (Brix, polarização – pol –, açúcares redutores totais – ART –, etc.), quantificando o rendimento industrial.
3. Controlar a qualidade da matéria-prima e dos insumos industriais (cal, ácido fosfórico, etc.).
4. Controlar a qualidade do produto final (açúcar e álcool).
5. Controlar os resíduos e efluentes industriais.

1.3 Laboratório industrial

As diversas operações necessárias para o controle industrial, como a coleta de amostra e as análises químicas, estão a cargo do laboratório industrial, que deverá dispor dos recursos humanos e materiais compatíveis com a responsabilidade inerente. A análise da matéria-prima em função do teor de sacarose para fins do pagamento da cana aos fornecedores fica ao encargo de um laboratório específico para esse fim.

Algumas unidades industriais ainda dispõem de laboratórios auxiliares, como o de microbiologia, para dar apoio à fermentação, e o de álcool, para controlar especificamente este produto, entre outros tipos de laboratório.

1.4 Boletins de controle

Uma usina ou destilaria deve registrar as informações obtidas no laboratório industrial nos denominados boletins de controle. Esses boletins devem ser simples e conter dados que permitam a detecção de qualquer anormalidade na fábrica. Os principais boletins de controle em uso no país são:

1. folha diária de laboratório;
2. boletim diário;
3. boletim semanal;
4. boletins auxiliares para coleta de dados na fábrica;
5. folhas auxiliares de cálculo.

A folha diária de laboratório é onde ficam registradas as análises realizadas durante o dia, para que os dados levantados fiquem agrupados e estejam facilmente disponíveis. É muito importante que essas informações sejam transmitidas aos operadores e encarregados do processo a fim de que possam ser utilizadas para a correção de qualquer anomalia. Ao final do dia deverá ser calculada a média diária do valor analisado.

Na Tabela 1.1, pode-se ver um fragmento da folha diária do laboratório enfocando os valores referentes ao pagamento da cana pelo teor de sacarose e as análises do bagaço.

Tabela 1.1 Fragmento da folha diária do laboratório.

Folha diária de laboratório						
	Saфра		Dia		Dias de saфра	
Horas	2	4	8	12	18	Média
Cana PCTS						
Pol (°Z)	13,5	13,4	14	13,9	14,1	13,78
Brix (%)	14,5	14,6	15	15,1	14,8	14,8
Fibra (%)	13	13	13	13	13	13
Pureza (%)	93,1	91,8	93,3	92,1	95,3	93,1
AR* (%)	0,27	0,31	0,26	0,30	0,19	0,45
ATR (%)	130,62	130,01	135,32	134,70	135,78	134,64
Bagaço						
Pol	2	2,3	2	2,5	2,3	2,22
Umidade	50	50,5	51	50	51	50,5
Fibra	47,6	46,8	46,6	47,1	46,3	46,9

*Açúcares redutores

Os boletins diários devem conter os dados analíticos obtidos pelo laboratório, bem como outros dados: quantia de cana processada, produção de açúcar e álcool, consumo de insumos e combustíveis. Eles devem ser encaminhados à gerência da empresa para que sejam tomadas as providências, caso seja necessário.

O boletim diário registra os valores médios no dia e a média geral até a data atual, permitindo comparações ao longo da saфра. Os números acumulados relativos à moagem são obtidos fazendo-se a soma dos valores diários no período até o dia em que é feito o registro. Os valores relativos à moenda ou difusor são ponderados até a data atual. Os boletins diários contêm uma coluna com as médias diárias (Md) e outra com as médias gerais anteriores (até a data, Ma). Dessa forma, a média geral até a data (M) pode ser calculada em função do número de dias de saфра até o dia anterior (n):

$$M = \frac{Md + n \cdot Ma}{n + 1}$$

No final da semana, deverá ser elaborado um boletim mais abrangente que apresente as médias semanais dos dados (boletim semanal), não sofrendo, dessa forma, interferência das oscilações diárias, e que deverá contar com as seguintes informações:

1. números referentes às análises realizadas;
2. números referentes à quantia de cana processada;

3. números referentes à fabricação;
4. números referentes à produção de açúcar, álcool ou outros produtos ou subprodutos;
5. rendimentos;
6. balanço da pol;
7. demanda de insumos.

Além dos boletins já citados, são necessários outros, denominados de boletins auxiliares para a coleta das informações geradas na fábrica ou para o retorno de informação a ela. Alguns desses boletins estão listados a seguir:

1. folha diária de pesagem da cana;
2. folha diária de pesagem do caldo misto;
3. folha diária de pesagem da água de embebição;
4. folha diária de pesagem da torta;
5. folha diária de pesagem e do estoque de mel;
6. folha diária de pesagem e do estoque de açúcar.

1.5 Processo tecnológico

Um processo tecnológico pode ser definido como sendo um conjunto de operações destinadas a transformar um material, denominado de matéria-prima, em outro, denominado de produto, que apresenta uma maior utilização e valor agregado. As operações básicas utilizadas nesse processo são denominadas de operações unitárias, podendo-se dizer que um processo tecnológico é formado por uma associação de operações unitárias.

As operações unitárias podem ser classificadas de acordo com as modificações que elas realizam sobre o material em processamento:

Mecânica: quando o material processado sofre modificações estruturais sem nenhuma modificação mais profunda em seu estado ou composição.

Física: quando as modificações alteram a estrutura da matéria, mas sem alterar a sua composição química.

Química: quando a composição química do material em processamento é modificada.

Para realizar as transformações necessárias para a obtenção de produto, o processo tecnológico necessita muitas vezes de outros materiais além da

matéria-prima, denominados de insumos, e pode gerar outros materiais além do produto, denominados de subprodutos, caso sejam comercializáveis, ou resíduos, efluentes ou rejeitos, caso devam ser descartados (Figura 1.1).

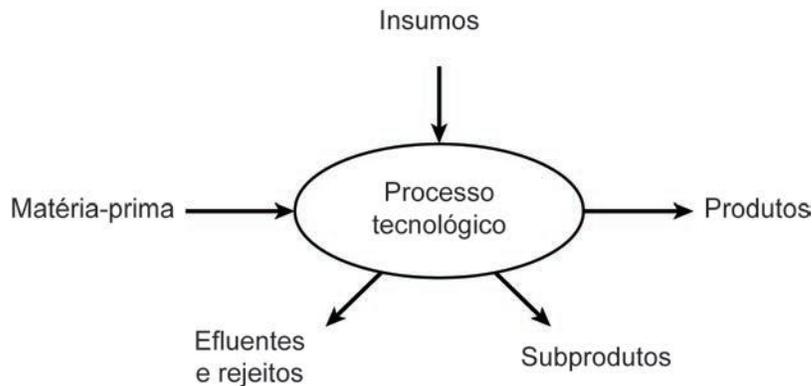


Figura 1.1 Processo tecnológico.

Os processos podem ser classificados, segundo o seu ritmo de trabalho, em:

Processo em bateladas (batch): é aquele em que, geralmente, a alimentação é realizada no início da operação, e o material processado é retirado em sua totalidade no final dela.

Processo contínuo: é quando a alimentação ocorre durante todo o tempo de processamento, assim como acontece com a retirada dos produtos.

Esses processos podem operar em regime ou estado estacionário ou em regime transiente. Um processo é estacionário quando as condições do sistema, como massa, vazão, temperatura, concentração, etc., não variam com o tempo. Caso contrário, diz-se que o sistema é ou se encontra em um estado não estacionário. O processo em bateladas é por natureza não estacionário.

1.6 Balanço de massa

As equações de balanço de massa constituem uma importante ferramenta de apoio ao controle químico de um processo tecnológico como o de uma usina de açúcar ou destilaria de álcool. Balanço de massa ou balanço material é o resultado da aplicação da lei da conservação da matéria em um sistema, enunciada pelo químico francês Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), que diz: “na natureza nada se perde, nada se cria, tudo se transforma”.

A expressão matemática do balanço de massa de um sistema estacionário pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\sum (\text{massa que entra}) = \sum (\text{massa que sai})$$

Em um sistema que opera em uma situação não estacionária (transiente), tem-se:

$$\sum (\text{massa que entra}) \neq \sum (\text{massa que sai})$$

Nos sistemas não estacionários pode ocorrer a situação em que a entrada de massa é maior que a saída:

$$\sum (\text{massa que entra}) \geq \sum (\text{massa que sai})$$

Nesse caso, ocorre o aumento do material estocado no processo. O caso contrário acontece quando a saída de massa é maior que a da entrada:

$$\sum (\text{massa que entra}) \leq \sum (\text{massa que sai})$$

Nesse caso, a operação sofre uma diminuição do material em processamento.

No caso de processo em que não ocorre reação química, o tratamento de cada componente é similar ao do balanço global, podendo-se realizar o balanço de massa por componente. No caso da ocorrência de reação química, esta deve ser conhecida e o balanço de massa deve ser realizado com auxílio da estequiometria.

Em um processo em que não ocorre reação química, tem-se:

Componente que sai = componente que entra – acúmulo de componente

em que se pode considerar que o acúmulo é igual a zero para os processos estacionários.

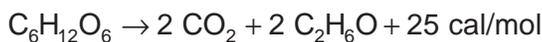
1.7 Estequiometria

Estequiometria é o estudo e o cálculo das relações (mensuráveis) quantitativas de reagentes e produtos em reações químicas (ou equações químicas).

A palavra vem do grego *stoikheion* (elemento) e *metron* (medida). Para fazer uso da estequiometria é necessário conhecer a reação química envolvida. Em um processo em que ocorre reação química, tem-se:

Componente que sai = componente que entra – componente que reage –
acúmulo de componente

Um exemplo de balanço de massa com reação química é a produção de álcool, em que, na operação de fermentação, o líquido açucarado denominado mosto, no reator bioquímico ou na dorna fermentadora, sofre uma reação por ação da levedura, transformando os açúcares em álcool etílico e bióxido de carbono, conforme a equação química a seguir:



Como exemplo, considera-se uma indústria de vinho que fermenta 100 kg/h de um mosto com 15% p/p (por cento em peso) de Açúcares Redutores Totais (ART), produzindo um vinho com 6,8% de álcool. Qual seria o rendimento dessa fermentação?

Pela reação química anterior, tem-se que 1 mol de açúcar gera 2 moles de álcool etílico, ou seja, 180 g de açúcar geram 92 g de álcool. Assim, o mosto, com 15% de açúcar em peso, geraria, pelos cálculos estequiométricos:

$$\frac{15 \cdot 92}{180} = 7,7\% \text{ de etanol}$$

O cálculo do rendimento da fermentação pode ser realizado considerando que estequiometricamente a fermentação deveria resultar em um vinho com 7,7% de álcool, mas resultou em um com 6,8%, ou seja, na prática, a quantidade de álcool gerado foi menor que a prevista teoricamente. O rendimento da fermentação, conhecido como rendimento teórico ou estequiométrico, é a relação entre os dois valores expressos em porcentagem:

$$\text{Rendimento} = 100 \cdot \frac{6,8}{7,7} = 88,3\%$$

1.8 Balanço de massa de uma usina de açúcar

Uma usina de açúcar é uma sequência de operações, cada uma com seu valor de eficiência. A eficiência global da usina é o produto da eficiência das operações unitárias que compõem o processo, sendo esta última correspondente à fração do componente de interesse presente na matéria-prima que se encontra no produto final. O rendimento em açúcar (RA), dado em kg do produto por t de matéria-prima processada, pode ser calculado pela expressão:

$$RA \text{ (kg/t cana)} = 10 P_c \cdot \eta_L \cdot \eta_E \cdot \eta_T \cdot \eta_C \cdot (1 - P_i)$$

em que as eficiências estão expressas em fração decimal:

P_c : pol da cana em °Z;

η_L : eficiência da lavagem da cana;

η_E : eficiência da extração da sacarose;

η_T : eficiência do tratamento do caldo;

η_C : recuperação da sacarose no cozimento;

P_i : perdas indeterminadas no processo.

O fator multiplicativo 10 tem por objetivo transformar a pol, em °Z, em kg de pol por t de cana.

As perdas industriais que ocorrem em uma usina de açúcar podem ser classificadas como sendo:

Perdas físicas: aquelas que ocorrem no material eliminado, como o bagaço, a torta do filtro, a vinhaça, a flegmaça, etc.

Perdas químicas: aquelas que ocorrem devido a uma reação química envolvendo a sacarose, como a sua inversão, que resulta em sua transformação em glicose e frutose ou em ácidos orgânicos, que ocorre a pH superior a 7,5.

Perdas microbiológicas: aquelas causadas pela ação de bactérias que consomem açúcar para gerar ácidos, polissacarídeos como a dextrana, etc.

As perdas podem também ser classificadas segundo o seguinte critério:

Perdas determinadas: são as identificadas, como as perdas físicas, e estão relacionadas à eficiência de uma determinada operação do processo, como extração da moenda, eficiência da fermentação, etc.

Perdas indeterminadas: não são identificáveis, sendo quantificadas pela diferença entre os açúcares que entram e os que saem da indústria.

As perdas de sacarose determinadas em porcentagem, na cana, com suas respectivas faixas de valores para usinas localizadas no estado de São Paulo, são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 1.2 Porcentagem das perdas de sacarose.

Lavagem de cana	0,5 a 0,6%
Bagaço	3,2 a 3,7%
Torta de filtro	0,4 a 0,7%
Fermentação	3,6 a 4,8%
Destilação (vinhaça, flegmaça)	0,1 a 0,2%
Total	7,8 a 10,0%

Considerando que as perdas indeterminadas estão na faixa de 1,1 a 2,9%, pode-se estimar que as perdas totais das usinas estão na faixa de 8,9 a 12,9%, conforme apresentadas a seguir:

Tabela 1.3 Porcentagem das perdas totais de sacarose.

Perdas determinadas totais	7,8 a 10,0%
Perdas indeterminadas	1,1 a 2,9%
Perdas totais	8,9 a 12,9%

As causas das perdas indeterminadas podem ser, em muitos casos, resultantes de amostragem não representativa do material, o que implica em uma superestimativa ou subestimativa da eficiência de alguma operação. Outra causa pode ser um erro de calibração de algum instrumento analítico, o que provoca um erro sistemático para mais ou para menos no valor da polarização. Essas perdas seriam então classificadas como aparentes, ou seja, a perda na verdade não existe. Uma subestimativa da pol que entra na usina pode indicar a inexistência de perdas, dando uma falsa segurança para o empresário.

O grande causador de perdas reais de sacarose no processo seria a decomposição de açúcar provocada por algum problema nesse processo, como um tempo de estadia muito grande nos decantadores, a caleagem a um pH muito elevado ou muito baixo em relação a 7, uma exposição do caldo a uma temperatura muito elevada, entre outros.

A maior causa das perdas indeterminadas é a inversão da sacarose seguida da destruição dos redutores pela ação de calor ou de ambiente alcalino. Na evaporação podem ocorrer perdas de até 0,5% pelo processamento de caldos de baixo pH ou de arraste de açúcar. Na cristalização da sacarose já se observou a ocorrência de perdas da ordem de 0,4%.

Como exemplo, considera-se uma usina que processa uma cana com Pc de 15 °Z e tenha os seguintes parâmetros de eficiência:

Perdas na lavagem de 1% ($n_L = 0,99$)

Extração na moagem de 96% ($n_M = 0,96$)

Perdas no tratamento de 1% ($n_T = 0,99$)

Recuperação do açúcar no cozimento de 86% ($n_C = 0,86$)

Perdas indeterminadas de 2% (0,02)

$$R(\text{kg/t de cana}) = 10 \cdot 15 \cdot 0,99 \cdot 0,96 \cdot 0,99 \cdot 0,86 \cdot (1 - 0,02)$$

$$R = 118,9 \text{ kg/t de cana}$$

Dessa forma, a usina em questão produziria 118,9 kg de açúcar por t de cana processada.

UNIDADE 2

Controle da cana para fins de
pagamento pela qualidade

2.1 Introdução

A cana-de-açúcar, ao chegar à usina, é inicialmente pesada em balança rodoviária, que fornece um número muito importante para os cálculos açucareiros referente à quantia da matéria-prima recebida para ser processada. Após a pesagem, a cana é amostrada e analisada com um duplo objetivo:

1. Para as canas recebidas dos fornecedores, os dados analíticos permitem que se calcule o preço a ser pago ao fornecedor pela cana entregue.
2. Para as canas em geral, fornecer o teor de sacarose da cana que está entrando na usina. Esse valor tem uma importância nos cálculos de balanço de massa e de eficiência.

2.2 Sistema de pagamento da cana pelo teor de sacarose e qualidade (PCTS)

O sistema de pagamento da cana pelo teor de sacarose e qualidade (PCTS) adotado no estado de São Paulo prevê que as canas de fornecedores devem ser amostradas e analisadas nos itens pol, Brix e teor de fibra, que servem de parâmetros para a formação do preço da cana. Esse sistema é normalizado pelo Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Consecana-SP).

Além dos aspectos analíticos, o sistema PCTS prevê algumas restrições ao recebimento da cana, que seriam:

1. A cana, até 31 de agosto, deverá ser entregue até um máximo de 72 horas após a queima e até 60 horas a partir de setembro.
2. A cana entregue após o tempo estabelecido poderá sofrer desconto no valor de 0,2% por hora adicional.
3. Não serão computadas as horas que a cana não pode ser recebida devido à parada da moagem da indústria.

O sistema também define as características do veículo transportador de cana, que deverá ter sua carroceria adaptada para a coleta da amostra, seja por sonda horizontal ou oblíqua. As carrocerias deverão possuir, no mínimo, 5 vãos equidistantes ao longo de seu comprimento, separados entre si por uma distância máxima de 1 m. Nas Figuras 2.1 e 2.2, pode-se ver dois tipos de carrocerias de veículo transportador, com sete e com doze vãos, indicando os locais onde deverá ser realizada a coleta das amostras de cana.

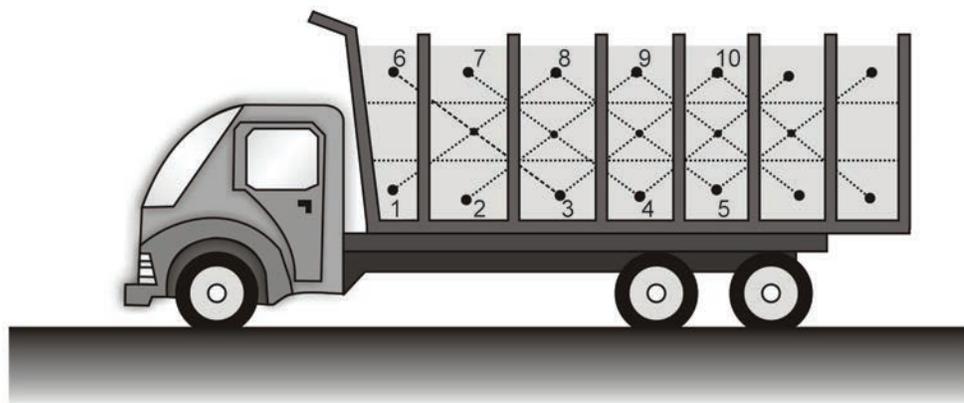


Figura 2.1 Veículo com sete vãos apresentando os locais de perfuração da carga para coleta de amostra.

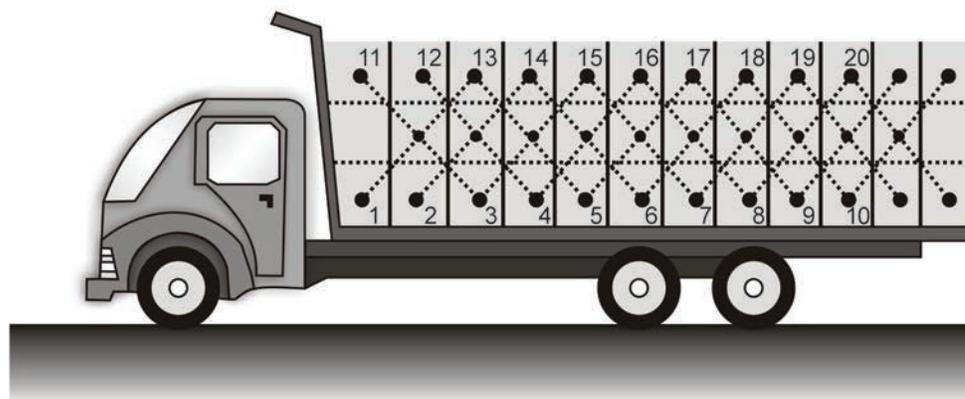


Figura 2.2 Veículo com doze vãos apresentando os locais de perfuração da carga para coleta de amostra.

O sistema de PCTS também prevê que a balança para a pesagem dos caminhões de cana na usina deve sofrer pelo menos duas avaliações por safra.

2.3 Entrega e amostragem das cargas

Como foi visto, as canas deverão ser entregues até 72 horas depois da queima, até 31 de agosto, e até 60 horas a partir de setembro. A cana entregue após o tempo estabelecido (T) poderá sofrer desconto no valor pago ao Açúcar Total Recuperável (ATR), conforme a expressão:

$$K = 1 - (H - T) \cdot 0,002$$

em que:

K: fator de desconto aplicado a ATR;

H: tempo entre a queima e a entrega;

T: assume o valor de 72 até 31 de agosto e de 60 a partir de setembro.

Na amostragem das cargas de cana, um dos itens mais importantes a ser observado é a representatividade da amostra coletada. A coleta da amostra é realizada por uma sonda em forma de um tubo giratório, com uma coroa dentada na extremidade. Esse equipamento perfura a carga de cana no próprio caminhão. Deve-se coletar amostra de três alturas diferentes e que não estejam na mesma linha vertical. As opções de coleta podem ser vistas na Figura 2.3.

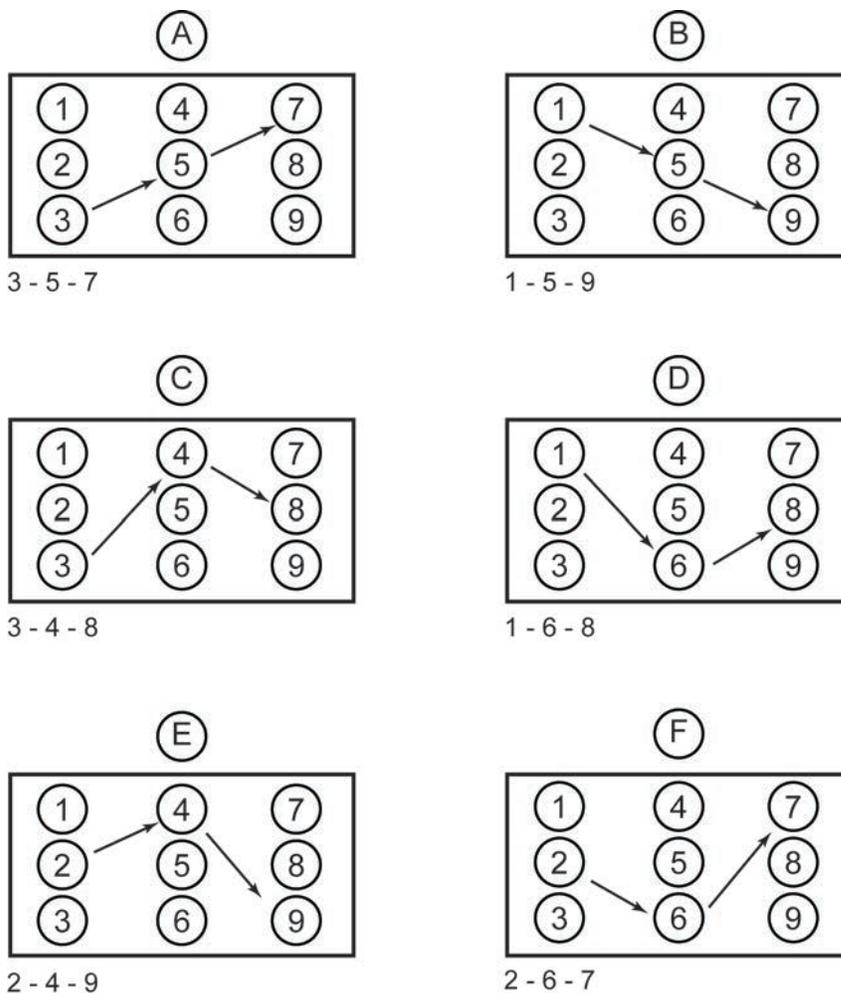


Figura 2.3 Diversas opções de coleta de amostra com sonda horizontal.

2.4 Sonda amostradora

A coleta de amostra de cana dos caminhões é realizada por uma sonda amostradora, constituída por um tubo giratório que trabalha a 300 rpm e que dispõe de uma coroa dentada na ponta. O tubo coletor de amostra pode se movimentar verticalmente, podendo perfurar o caminhão em diferentes alturas (ver Figura 2.4).

A sonda mecânica deve estar localizada após a balança, e a distância entre a coroa da sonda e a carga de cana não deve ser superior a 20 cm. A coroa dentada da sonda deverá ser trocada quando apresentar uma baixa eficiência de corte, mostrada pelo esmagamento e cisalhamento da amostra.

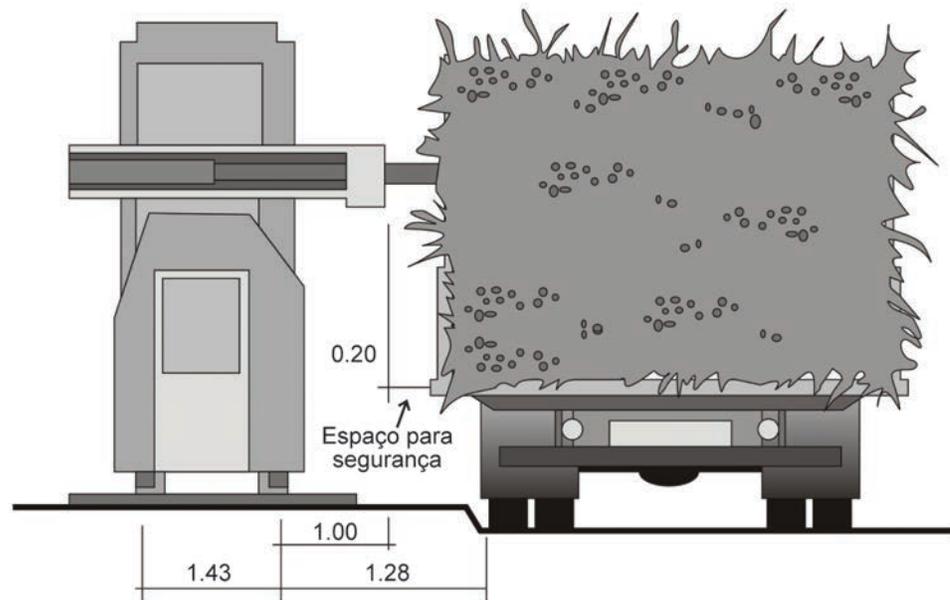


Figura 2.4 Sonda amostradora horizontal.

Atualmente, as usinas e destilarias estão utilizando também as sondas oblíquas, que perfuram o caminhão pela sua parte superior, coletando amostra de todo o perfil vertical da carga numa só amostragem (ver Figura 2.5). Isso resulta numa economia de tempo, pois a sonda horizontal deve coletar material de três diferentes alturas, ou seja, fazer três coletas para resultar numa amostra representativa.



Figura 2.5 Sonda oblíqua para amostragem de cana.

2.5 Amostragem das cargas

A amostragem dos caminhões na usina é realizada individualmente, de preferência distribuída ao longo do dia, especialmente quando o número de carregamento superar dez. A amostra nunca deverá ter menos de 10 kg, e a sonda amostradora deverá ser introduzida integralmente na carga e totalmente esvaziada após a operação. Quando não for possível inserir totalmente o tubo amostrador, será necessária a sua reinserção no mesmo furo.

2.6 Tratamento da amostra

A amostra coletada pela sonda amostradora deverá ser preparada em um aparelho desintegrador tipo forrageira, que deverá manter suas características originais, com as facas sendo substituídas após 250 amostras e as contrafacas reguladas a uma distância de $2,0 \pm 0,5$ mm. As facas e as contrafacas deverão estar sempre afiadas, não devendo apresentar bordas onduladas ou arredondadas.

A amostra desintegrada deverá ser homogeneizada em um equipamento tipo betoneira, adaptada com raspadores para impedir a retenção da amostra no fundo. Uma quantidade de amostra de 1,5 a 2,0 kg será enviada ao laboratório, dos quais 500 g serão utilizados nas análises.

2.7 Laboratório de análise de cana

O laboratório de análise de cana deverá estar localizado nas proximidades do local de coleta de amostra, e sua temperatura interna deverá ser mantida na faixa de 20 ± 5 °C. Os equipamentos desse laboratório devem ser adequados ao volume de análises necessárias.

Os equipamentos básicos para a realização das análises para fins de PCTS são:

- sonda amostradora, que pode ser no modelo horizontal ou inclinada;
- desintegrador tipo forrageira;
- prensa hidráulica com condição para operar com pressão de 250 kg/cm² por 1 minuto;
- estufa de circulação forçada;
- homogeneizador tipo betoneira adaptada com raspadores;
- refratômetro digital com correção automática de temperatura ou com banho termostaticado acoplado;
- balança semianalítica;
- sacarímetro digital;
- extrator tipo sul-africano;
- espectrofotômetro NIR, quando utilizado para substituir o sacarímetro e o refratômetro;
- aparelho para determinar o Índice de Preparo (IP).

Além dos equipamentos listados acima, o laboratório deverá dispor de reagentes da categoria PA e de vidrarias calibradas. Os equipamentos e reagentes devem ser previamente homologados pelo Consecana do estado onde se encontra a unidade industrial.

A edificação onde o laboratório está instalado deve dispor de abastecimento de energia elétrica estável, não apresentar vibrações que prejudiquem a aferição dos instrumentos, em especial as balanças, e dispor de água tratada e água destilada.

2.8 Procedimentos analíticos

Após a coleta da amostra de cana, ela deve ser homogeneizada, e o material enviado ao laboratório, onde inicialmente são pesados 500 g com tolerância

de $\pm 0,5$ g. O material restante deverá ser guardado como contraprova até que as análises (pol e Brix) estejam terminadas.

Para que sejam realizadas as análises de polarização e Brix da cana, é necessária a extração do caldo da amostra, numa operação que deve ocorrer logo após a desintegração do material.

O caldo será extraído em uma prensa hidráulica com pressão constante de 24,5 MPa (250 kg/cm²), aplicada durante 1 minuto. O manômetro e a prensa deverão ser calibrados por órgão competente a cada safra.

A determinação do Brix do caldo (B) será realizada em refratômetro digital de leitura automática, com correção automática de temperatura e com saída para impressora. A resolução máxima do equipamento será de 0,1 °Brix, expresso a 20 °C. Quando houver a presença de impurezas minerais no caldo, este deverá ser filtrado em papel qualitativo.

A polarização do caldo (P) será determinada em sacarímetro digital, automático, com peso normal igual a 26 g, resolução de 0,01 °Z e aferido a 20 °C, provido de tubo polarimétrico de fluxo contínuo e com saída para impressora e/ou registro magnético de dados. Para essa análise, o caldo deverá ser previamente clarificado com uma mistura clarificante à base de alumínio, que poderá ser preparada no próprio laboratório.

A quantidade da mistura à base de alumínio recomendada deverá ser, no mínimo, de 6 g/100 ml; quantidades maiores poderão provocar a diminuição da leitura sacarimétrica. Uma reprodução esquemática dos procedimentos para a realização da amostragem e análise pode ser vista na Figura 2.6.

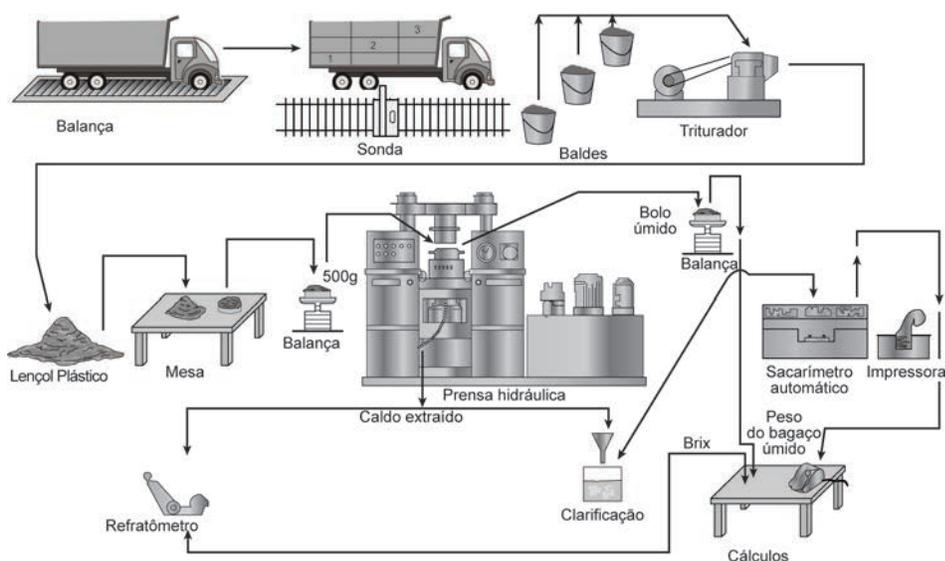


Figura 2.6 Sequências de operações para a análise da cana para fins de PCTS.

2.9 Cálculos dos resultados

Na análise laboratorial, o Brix do caldo pode ser considerado como sendo o próprio valor lido no refratômetro. No caso da polarização do caldo (S), o seu valor pode ser obtido pela aplicação da fórmula:

$$S = LPb \cdot (0,2605 - 0,0009882 \cdot B)$$

A transformação da leitura sacarimétrica com a mistura clarificante, à base de alumínio, para a leitura equivalente em subacetato de chumbo será feita pela equação:

$$LPb = 1,00621 \cdot LAI + 0,05117$$

LPb = Leitura sacarimétrica equivalente a de subacetato de chumbo;

LAI = Leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de alumínio.

Assim sendo, a equação completa para o cálculo da pol da cana (S) passa a ser a seguinte:

$$S = (1,00621 \cdot LAI + 0,05117) \cdot (0,2605 - 0,0009882 \cdot B)$$

em que B: Brix do caldo.

A polarização do caldo extraído é dada pela expressão:

$$P_{ex} = \frac{0,26 \cdot L}{d}$$

em que:

L: leitura do sacarímetro;

d: densidade do caldo (obtida em função do Brix, consultando tabela).

Todo o caldo clarificado deverá ser usado para a leitura sacarimétrica, fixando-se o mínimo de 70 ml. Na hipótese de lavagem do tubo sacarimétrico com água, usar 100 ml de caldo para a próxima leitura da pol.

O cálculo da pureza aparente do caldo é realizado pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{100 \cdot S}{B}$$

em que:

S: pol do caldo;

B: Brix do caldo.

A unidade industrial poderá recusar o recebimento de carregamentos de cana com pureza do caldo abaixo de 75%. Os carregamentos, analisados conforme essas normas e cuja pureza do caldo estiver abaixo de 75%, se descarregados, não poderão ser excluídos do sistema.

O teor de açúcares redutores por cento caldo pode ser estimado em função da pureza do caldo. Cada região produtora de cana, açúcar e etanol possui uma fórmula para essa estimativa. No estado de São Paulo a expressão adotada é a seguinte:

$$AR \% \text{ caldo} = 3,641 - 0,0343 \cdot Q$$

em que Q: pureza aparente do caldo, expressa em porcentagem.

O cálculo do AR pela maneira descrita é um modo indireto de se estimar esse valor. Caso se deseje um número mais preciso, especialmente para ser utilizado nos cálculos de balanço de massa, deve-se realizar uma análise do caldo utilizando-se de uma metodologia específica, como o método Lane & Eynon.

O cálculo da fibra na cana (F) é realizado em função do peso do bagaço após a prensagem, conhecido como peso do bagaço úmido (PBU), e, segundo a Consecana do Estado de São Paulo, se dá pela equação:

$$F = 0,08 \cdot PBU + 0,876$$

em que PBU é o peso do bagaço úmido da prensa, em gramas.

As unidades industriais poderão optar pela determinação direta da fibra da cana pelo método de Tanimoto, em que um peso conhecido de bagaço é lavado para a eliminação dos sólidos solúveis (Brix), secando, a seguir, em estufa. O cálculo se dá pela seguinte equação:

$$F = \frac{100 \cdot PBS - B \cdot PBU}{5 \cdot (100 - B)}$$

em que:

PBS: peso do bagaço seco;

PBU: peso do bagaço úmido;

B: Brix do caldo.

O valor da pol obtida pela análise do caldo corresponde ao teor de sacarose desse caldo. Para fins de PCTS, necessita-se da pol dos colmos de cana, pol da cana (P_c), que pode ser calculada em função da pol do caldo e do teor de fibra da cana, ou seja:

$$P_c = S \cdot (1 - 0,01 \cdot F) \cdot C$$

em que:

S: pol do caldo;

F: fibra da cana;

C: coeficiente de transformação da pol do caldo extraído em pol do caldo absoluto, calculado pela equação:

$$C = 1,0313 - 0,00575 \cdot F$$

ou

$$C = 1,02626 - 0,00046 \cdot PBU$$

em que:

PBU: peso do bagaço úmido da prensa;

F: fibra da cana.

Da mesma forma, necessita-se converter o teor de açúcares redutores do caldo em AR da cana (ARC), conversão realizada pela equação:

$$ARC = AR \cdot (1 - 0,01 \cdot F) \cdot C$$

em que:

AR: açúcares redutores do caldo;

C: coeficiente de transformação de pol do caldo em pol da cana, já definido.

2.10 Açúcares totais recuperáveis

O cálculo do açúcar total recuperável (ATR) é realizado conhecendo-se a pol da cana (Pc) e os açúcares redutores da cana (ARC), e se dá pela equação:

$$\text{ATR} = 10 \cdot \text{Pc} \cdot 1,0526 \cdot 0,905 + 10 \cdot \text{ARC} \cdot 0,905$$

ou

$$\text{ATR} = 9,5263 \cdot \text{Pc} + 9,05 \cdot \text{ARC}$$

em que:

10 · Pc: pol por tonelada de cana;

1,0526: coeficiente estequiométrico para a conversão de pol em açúcares redutores;

0,905: coeficiente de recuperação, para uma perda industrial de 9,5%;

10 · ARC: açúcares redutores por tonelada de cana.

2.11 Espectrofotometria no Infravermelho Próximo

O Brix e a pol do caldo poderão ser determinados pela utilização da Espectrofotometria no Infravermelho Próximo (NIR), após a definição das curvas de calibração, construídas com os resultados de Brix e de pol dos métodos tradicionais. As curvas de calibração devem ser atualizadas a cada safra, por meio da inserção de, no mínimo, 300 novos pares de dados representativos, obtidos no transcorrer das safras.

Os laboratórios que utilizarem a Espectrofotometria no Infravermelho Próximo (NIR) deverão realizar, diariamente, ao longo do período de seu funcionamento, 30 análises tecnológicas, em paralelo, de Brix e de pol, conforme as normas do Consecana, para fins de aferição de resultados e inserção de novos pares de dados representativos para a atualização das curvas de calibração da metodologia espectrofotométrica. Serão considerados dados representativos aqueles que apresentarem uma distribuição homogênea no histograma de frequência de resultados.

2.12 Informação dos dados obtidos

A coleta dos dados de pesagens da cana, tanto analíticos quanto dos tempos de queima, deverá ser automatizada. Ficará à disposição do produtor de cana e da sua associação de classe um comprovante impresso ou registro magnético logo após a última determinação analítica.

Os valores tecnológicos quinzenais ponderados e as informações sobre a cana fornecida, com a identificação do produtor e do respectivo fundo agrícola, deverão ser encaminhados por meios magnéticos, impreterivelmente até cinco dias úteis após o término da quinzena, ao Consecana-SP e às associações de classe dos produtores de cana.

ANEXO 1

Preparo da mistura clarificante à base de alumínio (CONSECANA, 2006)

- **Cloreto de alumínio hexa-hidratado:** especificação mínima de reagente com grau analítico (p.a.), com pureza maior ou igual a 90%;
- **Hidróxido de cálcio:** especificação mínima de reagente p.a., com pureza maior ou igual a 95%;
- **Auxiliar de filtração:** a sua especificação não é crítica para a mistura, pois ela não interfere nas reações de clarificação. Os seguintes produtos podem ser usados: Celite nuclear 545, Celite Hyflo Supercel, Perfiltro 443 e Fluitec M10 e M30.

Tabela 2.1 Quantidades de cada produto necessárias para se produzir 1.000 g da mistura.

Produto	Quantidade
1 parte de hidróxido de cálcio	143 g
2 partes de cloreto de alumínio hexa-hidratado	286 g
4 partes de auxiliar de filtração	571 g

Homogeneização: A homogeneização é um ponto crítico no preparo da mistura. Recomenda-se que sejam misturados em quantidade suficiente para um dia, em homogeneizador para produtos em pó que promova uma mistura adequada.

ANEXO 2

Determinação do Índice de Preparo (IP) do equipamento

- balança semianalítica, com resolução máxima de 0,5 g;
- aparelho para determinação do Índice de Preparo, com velocidade de 60 ± 5 rpm (Figura 2.7);
- extrator tipo sul-africano;
- sacarímetro digital automático.

Técnica

- desintegrar, no equipamento a ser avaliado, uma amostra de cana obtida em sonda amostradora horizontal ou oblíqua;
- homogeneizar a amostra desintegrada;
- transferir 500 g dessa amostra para o copo do extrator;
- adicionar 2.000 ml de água destilada;
- ligar e manter o digestor em agitação durante 15 minutos;
- resfriar e filtrar o extrato obtido em funil de tela de filtro rotativo ou em algodão;
- clarificar, com mistura clarificante à base de alumínio, uma alíquota de 200 ml do extrato filtrado e efetuar a leitura sacarimétrica, obtendo-se a leitura “zero” (Lo);
- transferir para os recipientes do aparelho de IP mais duas subamostras de 500 g da mesma amostra preparada e homogeneizada;
- adicionar a cada recipiente 2.000 ml de água destilada, ligar e manter o aparelho em agitação por 15 minutos;
- clarificar, com clarificante à base de alumínio, alíquotas de 200 ml dos dois recipientes do aparelho;
- efetuar as leituras sacarimétricas das alíquotas clarificadas e calcular a leitura média (Lm).

Cálculo do Índice de Preparo:

$$IP = 100 \cdot \frac{L_m}{L_o}$$

em que:

L_o : leitura sacarimétrica do extrato obtido com o extrator;

L_m : média das leituras dos extratos obtidos com o aparelho para determinação do IP.

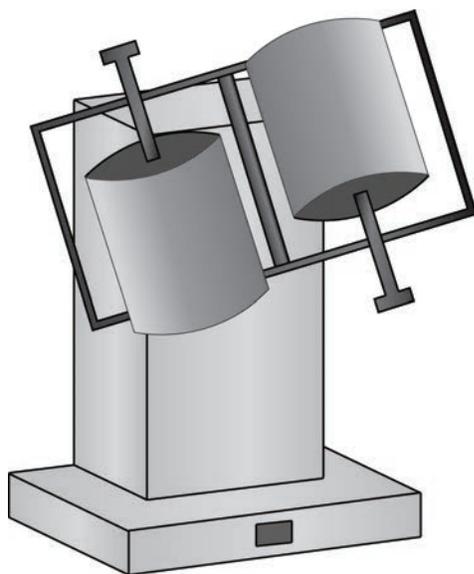


Figura 2.7 Aparelho para a determinação do IP.

UNIDADE 3

Amostragem

3.1 Introdução

Inicialmente, deve-se considerar a importância da amostragem no controle do processo em uma indústria em geral e na indústria de açúcar e álcool, em particular. Uma análise química realizada em um laboratório, por mais cuidadosa e precisa que seja, pode ter seu valor prejudicado se a amostra não for representativa do material original. Tanto a sistemática de coleta de amostra (amostragem) como a escolha do local de coleta, o tamanho da amostra e a frequência da amostragem devem ser bem estudados e padronizados.

3.2 Coleta e composição da amostra

A sistemática de amostragem depende do produto que se deseja analisar e da operação que se pretende controlar. Em processos contínuos, a amostragem contínua deve ser a preferida. As operações em bateladas devem ser amostradas de forma descontínua. Deve-se também dar preferência à amostragem automática realizada por um operador, para evitar qualquer erro humano. Não sendo possível, é necessário treinar a pessoa encarregada da coleta do material, criando procedimentos operacionais padrões que evitem qualquer critério subjetivo na operação.

3.3 Amostra

Para reduzir o trabalho do laboratório, a amostra pode ser composta, ou seja, várias coletas realizadas em um certo período são analisadas em conjunto após uma homogeneização e retirada de uma subamostra. O material retirado deve ser conservado para uma análise em um horário conveniente. De modo geral, a amostra deve ser composta de forma a obter um material representativo de um período de quatro horas, em alguns casos seis horas ou mesmo oito, dependendo da importância da informação resultante da análise do material.

Não deve ser esquecido que amostras de material açucarado podem sofrer rápida deterioração caso não sejam bem conservadas. Assim, devem ser utilizadas técnicas de preservação específicas para o material em questão.

3.4 Água de lavagem de cana

A cana recebida na usina, em geral a colhida manualmente após a queima da palha, apresenta um alto teor de material estranho, como partículas de terra, areia, etc. Esse material é eliminado pela lavagem da cana em operação realizada na mesa alimentadora.

A água que sai do sistema após a lavagem da cana deve ser encaminhada para um processo de tratamento e em seguida reutilizada. Essa água deve ser amostrada e analisada, principalmente nos itens teor de ART e pH, para se avaliar as perdas de açúcar no sistema.

O local de coleta da amostra é na entrada da água na mesa alimentadora, imediatamente antes da lavagem, e na saída da água, após essa operação. Deve-se dar preferência à coleta contínua de material, mas, não sendo possível, uma coleta a cada duas horas é satisfatória.

Para que não ocorra a deterioração do material, deve se adicionar imediatamente 3 ml de cloreto de mercúrio a 13% para cada litro de amostra e acondicionar num refrigerador enquanto se aguarda a análise, por um período que não deve ser superior a 24 horas. As análises indicadas são pH e ART; o pH pode ser analisado a cada 2 horas, e os ART uma vez ao dia.

3.5 Cana-de-açúcar desfibrada

Como já foi visto, a cana é analisada inicialmente em amostra coletada para fins de PCTS. Para o controle químico da indústria, deve-se realizar uma amostragem em um material mais homogêneo e compacto, que seria a cana coletada na esteira após o desfibrador.

Como a cana recebida consiste em um material bastante heterogêneo, devido às diferentes variedades, tipo de colheita, grau de maturação, etc., a amostragem deve ser a mais frequente possível. É recomendado que a coleta de material ocorra durante um tempo de no mínimo 15 minutos. Um cuidado que se deve ter na amostragem de material particulado, como a cana desfibrada, consiste em retirar a amostra de todo o perfil vertical da esteira e em toda a sua largura, para se preservar a representatividade da amostra.

O material coletado em cada amostragem deve ser acondicionado em um saco plástico rotulado. Nesse material, analisa-se a pol, o Brix e o IP (índice de células abertas pelo preparo da cana).

3.6 Bagaço

O bagaço da cana constitui-se também de um material particulado, apresentando, assim, os mesmos problemas de amostragem que a cana desfibrada. Como sua composição pode variar do centro da esteira para a periferia, é importante que a coleta de amostra ocorra em toda a largura transversal da esteira.

Devido às dificuldades de automação, a amostragem do bagaço é realizada manualmente numa frequência de hora em hora, e numa quantidade mínima de

1 kg por coleta. A amostra de bagaço coletada deve ser mantida em recipiente fechado para evitar a perda de umidade. A cada intervalo de quatro a seis horas, a amostra é retirada do recipiente, homogeneizada e uma subamostra é coletada.

Para que o bagaço não entre em deterioração enquanto aguarda a análise, no recipiente fechado em que se encontra deve ser adicionado um preservante, em geral um algodão embebido em uma mistura de uma parte de clorofórmio e seis partes de amoníaco. O preservante deve ser colocado de forma que não entre em contato com o bagaço amostrado (Figura 3.1).

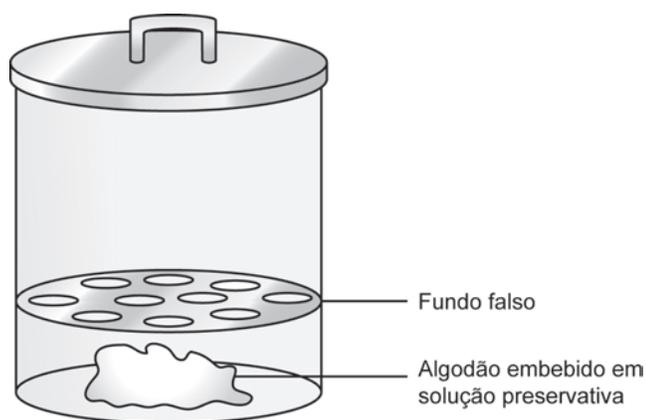


Figura 3.1 Recipiente para acondicionamento de bagaço.

Muitas vezes, numa moenda, é necessária a análise do bagaço das esteiras intermediárias que transportam o material entre os ternos. Esse bagaço, conhecido como bagaço intermediário, deve ser coletado com os mesmos cuidados da coleta do bagaço final, ou seja, em toda a extensão e profundidade do colchão de material. Para realizar essa coleta, deve-se retirar uma amostra que não tenha recebido embebição ou retorno das peneiras ou do *cush-cush* (peneira de rastelo).

3.7 Caldos

A amostragem de líquidos é mais simples que a de sólidos, especialmente nos aspectos de homogeneização. No entanto, se a amostragem tem por objetivo a determinação de material insolúvel em suspensão, alguns cuidados devem ser tomados para evitar que ocorra uma decantação, inutilizando o ensaio.

Os caldos amostrados são os primários, o do último terno e o caldo misto, sendo este último o mais importante sob o ponto de vista do controle químico, pois ele indica o quanto de sacarose (pol) está entrando na fábrica. Caso a amostragem desses caldos seja manual e o material seja, posteriormente,

composto e analisado, é necessário realizar a sua preservação pela adição de uma solução alcoólica de cloreto de mercúrio na razão de 0,05 ml por litro de caldo. A recomendação é que no período de quatro a seis horas a amostra seja composta, homogeneizada e analisada.

Caldo clarificado é aquele que é retirado do decantador e seu destino é a evaporação, cristalização, etc. Por ser um material de fácil amostragem, recomenda-se que o processo seja contínuo, similar ao adotado para o caldo misto. O caldo clarificado apresenta uma temperatura elevada, superior a 90 °C, portanto deve ser inicialmente resfriado e preservado com solução de cloreto de mercúrio de maneira similar a do caldo misto.

As análises do caldo clarificado devem ser realizadas em amostras compostas em intervalos de seis horas. As determinações analíticas recomendadas são a pol e o Brix. Algumas unidades produtoras de açúcar de alta qualidade analisam também a turbidez e o pH do caldo em amostra coletada de hora em hora.

O caldo filtrado também deve ser analisado em amostra coletada a cada uma hora, sendo composto a cada seis horas para análise. As análises recomendadas para esse material são pol, Brix e pH. O caldo filtrado deve ser preservado de maneira similar aos outros caldos, pela adição de cloreto de mercúrio.

3.8 Torta do filtro

A torta do filtro rotativo a vácuo ou da peneira desaguadora consiste em um material sólido de difícil amostragem e de deterioração bastante rápida. A recomendação é retirar uma amostra instantânea do material, em toda a sua extensão, seguida da homogeneização e, se possível, da análise do material. A frequência de coleta do material deve ser de três em três horas, e as determinações analíticas são pol, umidade e ART.

Caso a indústria disponha de mais de uma unidade de filtração, deve-se amostrar na frequência indicada para cada uma das unidades, pois o objetivo da análise é avaliar o comportamento do equipamento. Caso se necessite aumentar o intervalo de tempo entre as análises, deve-se transportar as amostras coletadas para o laboratório a cada três horas, em seguida homogeneizar e retirar as subamostras, que serão acondicionadas em um recipiente pequeno próprio por um período de, no máximo, oito horas.

Deve-se utilizar um conservante, por exemplo, 10 ml de amoníaco, embebido em algodão depositado sob o fundo falso do recipiente (similar ao utilizado para bagaço). Pode se conservar o material sob refrigeração por 24 horas.

3.9 Xarope, massa e méis

Tal como o caldo clarificado, a análise do xarope não é importante para fins de balanço da massa do processo, mas fornece informação de grande valia sobre o comportamento da operação de evaporação. A amostragem mais recomendável seria a contínua, mas uma coleta a cada duas horas atende as necessidades de representatividade. Os itens analíticos mais importantes são o Brix e a pol, que permitem o cálculo da pureza. Devido ao elevado Brix desses materiais, a sua deterioração é bastante lenta, não sendo necessário recorrer a qualquer técnica de preservação.

Quanto à massa cozida, para as usinas que utilizam cozedores em bateladas, como a maioria das usinas existentes em nosso país, a coleta de amostra deve ocorrer no ato de descarregamento de cada cozimento. Para não sobrecarregar o laboratório e se ter dados de pouca utilidade, as unidades industriais, especialmente as de maior porte, compõem a amostra, analisando-a em intervalos de duas a três horas, sendo os itens analisados a pol e o Brix.

A análise dos méis (ricos e pobres) e do mel final tem por objetivo avaliar o esgotamento nas massas durante o cozimento. A amostragem desse material pode ser realizada de hora em hora, e a análise em amostra composta a cada quatro horas, sendo os itens analisados a pol e o Brix.

3.10 Açúcar

Com relação ao açúcar, a amostragem e a análise têm por objetivo classificar o produto nas diversas categorias que ele pode ser enquadrado para a sua comercialização. Açúcar cristal deve ser amostrado com mais frequência que açúcares brutos, do tipo VHP (*very high polarization*) ou demerara, e o procedimento consiste na retirada de uma alíquota para um determinado número de sacos de açúcar produzido. Esse material deve ser conservado em recipiente hermético enquanto aguarda a sua homogeneização e análise.

As análises realizadas em amostras de açúcar do tipo demerara ou VHP são, rotineiramente, de pol e de umidade, podendo ser acrescentadas as análises de cinzas, amido, dextrana, cor, etc. No açúcar cristal, as determinações variam em função do destino do produto, mas rotineiramente as análises seriam de pol, umidade, cor e cinzas, podendo-se acrescentar pontos pretos, partículas magnéticas, açúcares redutores, etc.

3.11 Mosto e vinho

O mosto é um dos fluidos industriais cuja representatividade do material amostrado é de grande importância para os balanços de massa do processo. Esse material deve ser amostrado na linha de alimentação das dornas, se possível de maneira contínua. O material coletado é sujeito à deterioração, devendo ser armazenado sob refrigeração ou receber uma adição de um conservante à base de bicloreto de mercúrio.

Recomenda-se que o material coletado seja composto a cada três horas nos itens analíticos Brix, ART, pH, nitrogênio e fósforo. Para fins de aprimoramento do controle, realizam-se também as determinações de acidez, potássio, cálcio, magnésio e em alguns casos dextrana e sulfito (em usinas produtoras de açúcar cristal, esta última determinação ganha importância).

A amostragem do vinho bruto na dorna deve ser realizada por amostrador tipo escafandro, no qual o líquido é coletado em todo o perfil vertical. Em dornas fechadas, deve-se instalar um coletor de amostra na saída da bomba que alimenta o trocador de calor. O vinho deve ser analisado nos itens: teor alcoólico, porcentagem de fermento, pH, acidez, glicerol e nitrogênio.

A determinação do teor alcoólico do vinho deve ser realizada logo após a coleta da amostra. Para as demais análises, como glicerol, acidez, teor de nitrogênio, etc., pode-se compor uma amostra que é analisada a cada 24 horas. A fermentação contínua exige uma amostragem contínua, e o material deve ser resfriado logo após a amostragem.

3.12 Pé de cuba

A levedura tratada na cuba de pré-fermentação deve ser amostrada e analisada logo após o equipamento estar carregado. A coleta deve ser com coletor tipo escafandro, devendo o sistema de agitação da cuba permanecer desligado durante a coleta. Se o tratamento operar de forma contínua, a amostra deve ser coletada entre a primeira e a segunda cuba. A amostra deve ser composta e analisada numa frequência de três em três horas. Os itens analíticos são: teor alcoólico, porcentagem de fermento, pH e acidez.

3.13 Vinho centrifugado e leite de levedura

O vinho centrifugado e o leite de levedura devem ser analisados nos itens teor alcoólico e teor de fermento. A coleta e análise do material deve

ocorrer numa frequência de quatro em quatro horas. A análise deve ser realizada logo após a coleta do material, e o ponto de retirada mais aconselhável está na saída da centrífuga, tendo o cuidado de que a amostra seja colhida de todas as máquinas em operação.

3.14 Vinhaça e flegmaça

A vinhaça é amostrada na coluna de destilação, e a flegmaça na coluna B de retificação. Como esses fluidos apresentam uma temperatura elevada, acima de 90 °C, devem ser imediatamente resfriados até a temperatura ambiente, para que o etanol presente não evapore. A principal determinação analítica realizada é o teor alcoólico, para se calcular as perdas na operação de destilação. A amostragem do material deve ser preferencialmente contínua ou em uma frequência de hora em hora. Algumas unidades adaptam válvulas solenoides ajustadas para realizar coletas de tempos em tempos, e essas frações são armazenadas em equipamento refrigerador localizado próximo ao local de amostragem.

3.15 Alcoóis

O produto final, seja o álcool anidro ou o hidratado, deve ser amostrado nos tanques medidores ou nos reservatórios. Para o tanque medidor, a amostragem deve ser de hora em hora. Nas unidades que não utilizam tanques medidores, pode ser realizada uma coleta contínua na tubulação que alimenta os reservatórios. As determinações analíticas mais comuns para álcool destinado a fins combustíveis são: teor alcoólico, acidez, condutividade elétrica e pH. Alcoóis especiais destinados a fins não combustíveis podem requerer outras determinações.

3.16 Amostragem e análise de outros materiais

Muitas vezes são necessárias análises especiais de outros materiais, como as águas efluentes do condensador multijato ou barométrico e dos condensados da evaporação. Nesses materiais, a análise mais indicada é o teor de ART para se avaliar as perdas de açúcar por arraste nos equipamentos. Essas análises, muitas vezes esporádicas ou realizadas numa frequência baixa e não rotineira, devem ser planejadas em função das informações que se deseja obter.

UNIDADE 4

Balanço de massa e controle de processo I

4.1 Introdução

Uma usina de açúcar ou destilaria de álcool consiste em uma sequência de operações, cada uma com seu valor de eficiência. A eficiência global do processo é o produto das eficiências das operações unitárias que o compõem. Assim, a eficiência global do processo açucareiro pode ser definida como sendo a porcentagem de sacarose produzida em relação à sacarose presente na cana-de-açúcar.

O controle de uma usina ou destilaria de álcool é o acompanhamento ao longo do tempo tanto da eficiência global como das eficiências individuais das operações, a fim de se criar um histórico de comportamento que permite detectar qualquer eventual anomalia. Para calcular as eficiências é necessário, além da amostragem e análise dos materiais que entram e saem das operações, realizar cálculos de balanço de massa, como será visto a seguir.

4.2 Lavagem de cana

O controle químico da lavagem da cana tem por objetivo quantificar as perdas que ocorrem nessa operação. O balanço de massa é realizado em função da quantidade de água requerida por t de cana, do teor de sacarose da cana e do teor de açúcares na água que entra na lavagem e que sai como efluente a ser tratado (Figura 4.1).

Por exemplo, considera-se uma usina que processa uma cana com 15 °Z de pol, que é lavada aplicando 5.000 litros de água por tonelada processada. A água aplicada tem um teor de ART de 50 mg/litro, e a água efluente um teor de 200 mg/litro. Calcular as perdas de sacarose na lavagem.

Perda de açúcar = Açúcar que sai nas águas = Açúcar que entra nas águas

Perda de açúcar = 200 – 50 = 150 mg/litro de água

Perda = 5.000 (litros) · 150 (mg/litro) = 750.000 mg/t de cana

Perda = 0,75 kg/t de cana

Considerando que a cana com 15 °Z de pol apresenta um total de 150 kg de sacarose por t de cana, tem-se:

Perda % sacarose na cana = $100 \cdot 0,75 / 150 = 0,5\%$

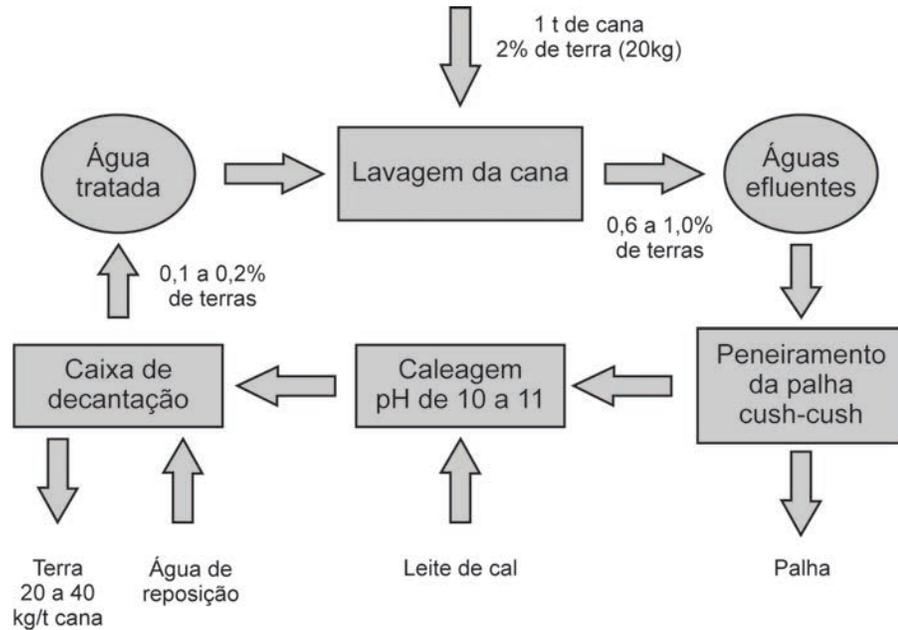


Figura 4.1 Fluxograma do processo de lavagem de cana.

4.3 Extração do caldo

Para se realizar os balanços de massa do sistema de extração de sacarose, seja ele por moendas ou por difusor, pode-se considerar que na prática não ocorrem reações químicas que possam alterar a composição do material em processamento, ou seja, os constituintes da cana são preservados. Assim, pode-se aplicar as equações de balanço de massa para os diversos cálculos de estimativas de vazões ou eficiências. As notações empregadas são aquelas que podem ser vistas na Figura 4.2.

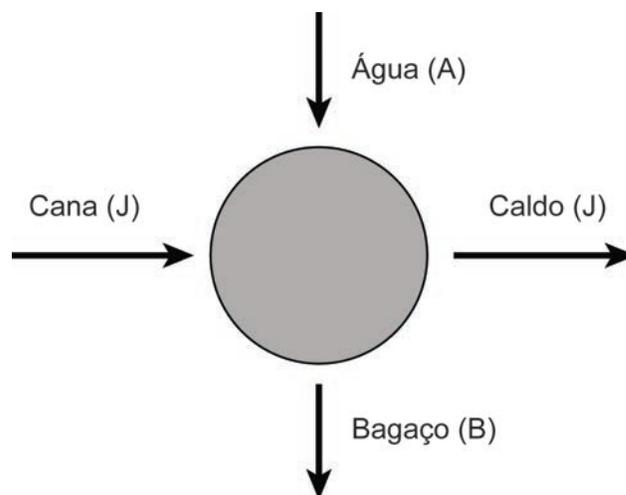


Figura 4.2 Notação dos fluxos em um sistema de extração do caldo de cana.

As equações de balanço de massa do setor de extração possíveis de serem realizadas são:

- Balanço de massa global:

$$C + A = J + B \quad (4.1)$$

- Balanço de sacarose:

$$C \cdot P_C = J \cdot P_J + B \cdot P_B \quad (4.2)$$

- Balanço de fibra:

$$C \cdot f_C = B \cdot f_B \quad (4.3)$$

em que:

C: quantia de cana processada;

A: vazão de água de embebição;

J: vazão de caldo;

B: geração de bagaço.

Todas essas grandezas são expressas em t por hora.

P_C , P_J e P_B : respectivamente a pol da cana, do caldo e do bagaço;

f_C e f_B : respectivamente o teor de fibra da cana e do bagaço.

Das fórmulas de balanço de massa apresentadas, pode-se deduzir expressões algébricas secundárias, como as apresentadas a seguir.

- Cálculo do volume de bagaço:

$$B = C \cdot \left(\frac{f_C}{f_B} \right) \quad (4.4)$$

- Cálculo da vazão de caldo:

$$J = \frac{(C \cdot P_C - B \cdot P_B)}{P_J}$$

- Cálculo da massa de água de embebição:

$$A = J + B - C$$

- Cálculo do caldo misto:

$$J = C + A - B$$

A quantia de água de embebição aplicada é normalmente relacionada à fibra na cana. O valor mais adotado é a aplicação de água em quantia igual ao dobro da fibra (200% da fibra). Assim, pode-se escrever que $A = Cfk/100$, em que k seria o fator que indica quantas vezes a vazão da embebição se relaciona com a fibra; dessa forma, para uma embebição de 200% da fibra, k assume o valor de 2.

Substituindo na equação de balanço geral de massa (Equação 4.1) a expressão de A , apresentada como $A = Cfk/100$, e a expressão de B , apresentada na Equação 4.4, tem-se:

$$J = C + C \cdot k \cdot f - \frac{C \cdot f_c}{f_b}$$

$$J = C \cdot \left(1 + k \cdot f_c \frac{f_c}{f_b} \right)$$

Considerando uma usina ou destilaria que processa uma cana com 13% de fibra ($f_c = 0,13$ em decimal), gerando um bagaço com 46% de fibra ($f_b = 0,46$) e com uma embebição de 20% da fibra ($k = 2$), calcular qual a produção de caldo misto por t de cana processada (1.000 kg).

Substituindo na fórmula, tem-se:

$$J = 1.000(1 + 2 \cdot 0,13 - 0,13/0,46)$$

$$J = 977 \text{ kg/t de cana}$$

Um parâmetro muito importante para a avaliação tanto da moenda como do difusor é a denominada “extração absoluta de sacarose”, ou simplesmente “extração absoluta”. Esse número expressa a porcentagem da sacarose contida

na cana que é efetivamente recuperada no caldo extraído. A definição pode ser expressa algebricamente como a seguir:

$$\text{Extração (\%)} = 100 \frac{\text{Pol no caldo misto \% cana}}{\text{Pol \% cana}}$$

Esse valor pode ser calculado de maneira indireta, como se segue:

$$\text{Extração (\%)} = 100 \frac{\text{Pol \% cana} - \text{Pol no bagaço \% cana}}{\text{Pol \% cana}}$$

A expressão algébrica mais recomendada para o cálculo da extração absoluta deduzida da fórmula indireta é apresentada a seguir:

$$E = \frac{100(\text{CP}_C - \text{BP}_B)}{\text{CP}_C}$$

em que:

E: extração absoluta em %;

C: cana moída em t (considerar igual a 1);

P_C : pol da cana em °Z;

B: bagaço produzido em t por t de cana;

P_B : pol do bagaço em °Z.

Como exemplo de aplicação da fórmula, será considerada uma usina que processa uma cana com uma pol de 18,0 °Z, gerando um bagaço com uma pol de 2,0 °Z, e a produção de bagaço é de 0,27 t/t de cana processada. Calcular a extração.

$$E = \frac{100(1 \cdot 18,0 - 0,27 \cdot 2,0)}{1} \cdot 18,0 = 97,0\%$$

Assim, pode-se concluir que 97,0% da sacarose presente na cana é extraída, passando a compor o caldo misto.

A extração absoluta é um parâmetro importante para a realização de cálculos de balanço de massa numa usina e destilaria, mas seu valor é grandemente influenciado pelo teor de fibra na cana e em menor escala pelo teor

de sacarose. Assim, se a necessidade é avaliar o comportamento da moenda, independentemente das características da matéria-prima, recomenda-se a utilização da denominada extração reduzida.

A transformação da extração absoluta em reduzida consiste em converter a extração absoluta para um teor de fibra padrão, que em geral é de 12,5%. Vários autores propuseram fórmulas para o cálculo da extração reduzida, e as mais utilizadas são:

$$\text{Extração reduzida (Deer)} = \frac{(100 - \text{Extração}) \cdot (100 - \text{Teor de fibra})}{7 \cdot \text{Teor de fibra}}$$

$$\text{Extração reduzida (Mittal)} = 100 - \frac{12,5 \cdot (100 - \text{Extração})}{\text{Teor de fibra}}$$

Existem também expressões que realizam a correção tanto para um teor de fibra como para uma pol padrão de 12,5%:

$$\text{Extração reduzida (Mittal)} = 100 - \frac{12,5 \cdot (100 - \text{Extração}) \cdot \text{Teor de sacarose}}{\text{Teor de fibra}}$$

Uma outra fórmula propõe que a correção ocorra para um teor de sacarose de 13,0%, e a de fibra padrão de 15,5%:

$$\text{Extração reduzida} = 100 - 0,1834 \cdot \frac{(100 - \text{Extração})(100 - \text{Fibra})}{\text{Fibra}} \left(\frac{\text{sacarose}}{13} \right)^{0,6}$$

A expressão mais adotada pelas usinas de nosso país é a de Mittal, cuja aplicação é dada a seguir:

Considerando uma moenda A, cuja extração absoluta é de 96%, processando uma cana com teor de fibra de 12%, e uma moenda B, processando uma cana com um teor de fibra de 14% e cuja extração absoluta seja de 95,5%, qual dos dois equipamentos está operando melhor?

$$E_A = 1 - \frac{12,5 \cdot (1 - 0,96)}{12,0} = 95,8\%$$

$$E_B = 1 - \frac{12,5 \cdot (1 - 0,955)}{14,0} = 96,0\%$$

A conclusão é que o equipamento B, apesar de apresentar uma extração absoluta menor, possui um desempenho melhor que o equipamento A.

4.4 Tratamento do caldo

O setor de tratamento do caldo de uma usina de açúcar necessita de um controle químico visando minimizar tanto as perdas determinadas, que ocorrem principalmente na torta do sistema de filtração, como as perdas indeterminadas, que ocorrem especialmente no clarificador pela destruição da sacarose. O controle também tem por objetivo o aspecto da qualidade do caldo tratado, que é controlado pela amostragem e análise da cor e turbidez do caldo clarificado. O fluxograma desse processo pode ser visto na Figura 4.3.

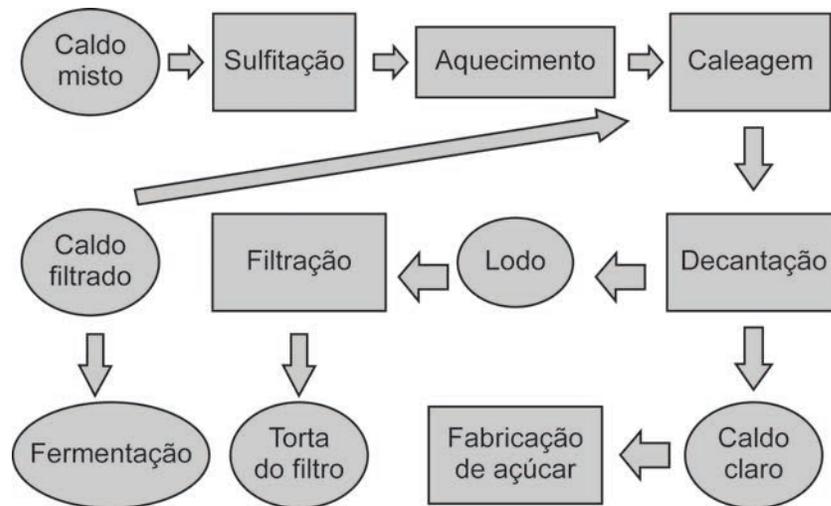


Figura 4.3 Fluxograma do tratamento do caldo para fins de balanço de massa.

Para fins de balanço de massa do sistema, o fluxograma pode ser representado como na Figura 4.4, na qual estão também as notações adotadas.

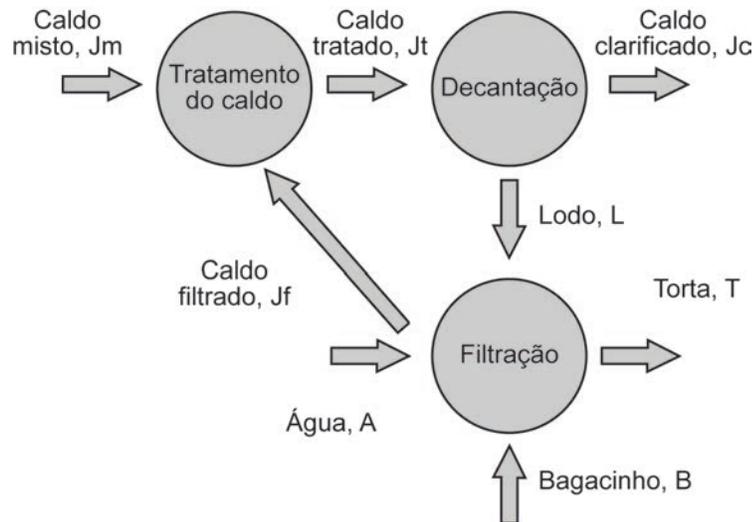


Figura 4.4 Fluxograma do tratamento do caldo com as notações adotadas.

No tratamento do caldo, pode-se fazer algumas considerações que simplificam os cálculos:

- Para fins de balanço de massa, o volume de leite de cal e de SO_2 é desprezível;
- Na prática, o volume de torta retirado é igual ao volume de água e bagacinho adicionado;
- O lodo retirado do decantador corresponde a 10 a 20% do fluxo total de massa;
- Em algumas usinas, o caldo filtrado não retorna ao tratamento de caldo, mas segue para a fermentação.

Das perdas no tratamento, o item mais significativo, como já foi visto, é na torta do filtro, que pode ser calculada conhecendo-se a sua produção, em kg por t de cana, e a sua pol, como no exemplo a seguir:

Uma usina processa uma cana com 15 °Z de pol, e no tratamento de caldo são gerados 40 kg de torta por t de cana, que apresenta uma pol de 2 °Z. Qual a perda percentual de sacarose?

Solução: Uma cana com 15 °Z corresponde a 150 kg de sacarose por t de cana. Assim, a torta produzida na razão de 40 kg por t de cana com 2 °Z representa:

$$40 \cdot \frac{2}{100} = 0,80 \text{ kg de pol/t de cana}$$

A porcentagem de açúcar perdido na torta em relação ao açúcar na cana será:

$$0,80 \cdot \frac{100}{150} = 0,53\%$$

O valor das perdas calculado da maneira acima necessita ser corrigido, pois parte do açúcar presente na torta não é originário de perda no processo, mas da sacarose contida no bagacinho adicionado como coadjuvante de filtração. A correção pode ser realizada pela expressão seguinte:

$$P'_T = \frac{T \cdot P_T - B \cdot P_B}{100} \cdot \frac{100}{T}$$

$$P'_T = \frac{T \cdot P_T - B \cdot P_B}{T}$$

em que:

P'_T : pol da torta corrigida, descontando a pol do bagacinho;

T: kg de torta produzida por t de cana;

P_T : pol da torta;

B: kg de bagacinho por t de cana;

P_B : pol do bagacinho.

Por exemplo, considerando-se uma usina onde sejam produzidos 40 kg de torta por t de cana (T), com uma pol de 2 °Z (P_T) e com uma aplicação de 6 kg de bagacinho por t de cana (B), cuja pol seja 2 °Z (P_B), calcular a pol corrigida:

$$P'_T = \frac{T \cdot P_T - B \cdot P_B}{T} = \frac{40 \cdot 2 - 6 \cdot 2}{40} = 1,7 \text{ °Z}$$

Segundo o cálculo já realizado, as perdas na torta seriam de 0,53% pol da cana.

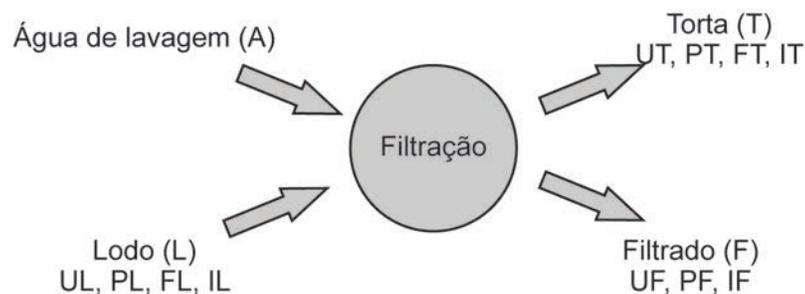
Utilizando o valor da pol corrigida, tem-se:

$$\text{Perda/t de cana} = 40 \cdot 1,7/100 = 0,68 \text{ kg}$$

$$\text{Perda \%} = 0,68 \cdot 100 / 150 = 0,45\%$$

Concluindo, as perdas reais seriam de 0,45% e não de 0,53%, como previsto inicialmente.

O tratamento do caldo por decantação resulta em dois fluxos de material, que seriam o caldo clarificado, destinado à fabricação de açúcar, e o lodo, formado por uma fração do caldo que contém os materiais insolúveis resultantes do tratamento. Esse lodo, após ser filtrado, ainda contém material insolúvel que o torna impróprio para ser utilizado na fabricação de açúcar, necessitando de um novo tratamento.



T, F, L e A: Fluxos mássicos da torta, do filtrado, do lodo e da água de lavagem.
 UT, UF e UL: Umidade da torta, do filtrado e do lodo.
 PT, PF e PL: Pol da torta, do filtrado e do lodo.
 FL e FT: Fibra no lodo e na torta.
 IT, IF e IL: Insolúveis na torta, no filtrado e no lodo

Figura 4.5 Fluxograma do processo de filtração.

O balanço de massa da filtração do lodo é realizado considerando-se que o sistema está operando em estado estacionário, ou seja, os fluxos de materiais que entram ou saem do filtro não sofrem grande variação com o tempo. Para fins de balanço, considera-se que existem quatro fluxos de materiais envolvidos no processo, sendo dois entrando no sistema (lodo e água de lavagem da torta) e dois saindo do sistema (torta de filtro e caldo filtrado), conforme fluxograma da Figura 4.5.

Pode-se considerar que os materiais envolvidos na operação de filtração são formados por: sólidos solúveis, umidade, fibra e sólidos insolúveis diferentes da fibra. A característica da torta de filtro por esse critério é obtida considerando-se a pureza do caldo presente na torta, estimada em 80%, e o teor de sólidos solúveis (Brix), estimado dividindo-se a polarização da torta por 0,80, ou multiplicando-se por 1,25. Como a totalidade da torta é formada pela umidade (U), fibra adicionada como bagacinho (F), materiais insolúveis (I) e materiais dissolvidos ($1,25 \cdot P$), podemos escrever:

$$100 = F + U + I + 1,25 \cdot P$$

Considerando os valores de F, U, I e P expressos em porcentagem, as equações de balanço de massa possíveis de serem geradas no setor são:

- Equação geral de balanço:

$$L + A = F + T \quad (4.5)$$

- Equação de balanço da fibra:

$$L \cdot F_L = T \cdot F_T \quad (4.6)$$

- Equação de balanço dos sólidos solúveis:

$$L \cdot 1,25 \cdot P_L = T \cdot 1,25 \cdot P_T + F \cdot 1,25 \cdot P_F \quad (4.7)$$

Como o valor dos sólidos dissolvidos na torta (1,25PT) é muito pequeno em relação aos sólidos dissolvidos no filtrado ($F \cdot 1,25 \cdot P_F$), pode-se escrever sem incorrer em grande erro:

$$L \cdot 1,25 \cdot P_L \approx F \cdot 1,25 \cdot P_F \quad (4.8)$$

A retenção dos insolúveis pelo sistema de filtração é determinada primeiramente pelo teor de açúcar perdido na torta, ou seja, a sua polarização. O segundo item de avaliação é a retenção dos insolúveis pelo filtro. O sistema de filtração nunca retém a totalidade dos insolúveis presentes no lodo, mas uma parte deles que pode variar numa ampla faixa.

De maneira geral, a eficiência dos filtros rotativos a vácuo não é satisfatória, apresentando um filtrado bastante turvo pela baixa retenção do material insolúvel do lodo. O termo retenção r é aqui definido como sendo a fração dos sólidos insolúveis do lodo retidos na torta.

$$r = 100 \cdot \frac{\text{Material insolúvel na torta}}{\text{Material insolúvel no lodo}}$$

$$r = 100 \cdot \frac{\text{Material insolúvel no lodo} - \text{Material insolúvel no filtrado}}{\text{Material insolúvel no lodo}}$$

O sistema de filtração, de modo geral, apresenta uma retenção de 50%. Entretanto, desde que se observem as recomendações técnicas para operá-lo, os valores de retenção podem ser maiores, tendo-se observado valores variando desde um mínimo de 48% até um máximo de 88%.

Cálculo da retenção pelo método da taxa de fibra:

$$\text{Taxa de fibra no lodo} = \frac{F_L}{I_L}$$

$$\text{Taxa de fibra na torta} = \frac{F_T}{I_T}$$

$$r = \frac{\text{Taxa de fibra no lodo}}{\text{Taxa de fibra na torta}} = \frac{F_L / I_L}{F_T / I_T} = \frac{F_L}{I_L} \cdot \frac{I_T}{F_T}$$

Como pode-se deduzir que $F_L/F_T = T/L$, tem-se:

$$r = \frac{T \cdot I_T}{L \cdot I_L}$$

Existem outros métodos, como o de análise do filtrado e da torta, apresentado a seguir:

$$r = \frac{\text{Insolúveis na torta}}{\text{Insolúveis na torta} + \text{Insolúveis no filtrado}}$$

Outro método seria o da análise do lodo e do filtrado, apresentado a seguir:

$$r = \frac{\text{Insolúveis no lodo} - \text{Insolúveis no filtrado}}{\text{Insolúveis no lodo}}$$

UNIDADE 5

Balanço de massa e controle de processo II

5.1 Aspectos iniciais

O processo de tratamento do caldo resulta no caldo clarificado, cujas características dependem do produto a ser fabricado. No caso da produção de açúcar, esse caldo deve apresentar baixa cor e turbidez e ausência de material em suspensão, o que, muitas vezes, exige o seu peneiramento como etapa final dessa fase do processo. Esse caldo segue para a etapa de evaporação, na qual o objetivo é a retirada da água que acompanha o produto.

5.2 Aquecimento e controle do caldo clarificado

O caldo clarificado apresenta uma temperatura bastante inferior à da caixa de evaporação, fazendo com que parte da área de troca térmica desse equipamento passe a atuar como aquecedor de caldo em detrimento de sua função evaporadora. Um caldo claro a 95 °C, alimentando um evaporador a 115 °C significa uma perda de superfície de 2 m² por t de cana processada por hora (TCH). Assim, a caixa, que deveria ter 14 m²/TCH, deverá ter 16 m²/TCH.

A demanda de vapor no aquecimento do caldo clarificado pode ser calculada de forma similar ao cálculo realizado para o aquecedor de caldo:

$$M = \frac{p \cdot c \cdot (t_1 - t_0)}{L} \cdot r = \frac{1.000 \cdot 0,9(115 - 95)}{535} \cdot 1,05 = 35\text{kg}$$

A conclusão é que serão consumidos 35 kg/h de vapor por t de cana.

O caldo clarificado deve ser amostrado com a técnica e na frequência já vista, devendo ser analisado nos seguintes aspectos:

- Itens para cálculo do balanço de massa: pol, Brix, AR.
- Item para avaliar perdas por inversão: coeficiente glucósico (relação entre os açúcares redutores e a pol expressa em porcentagem).
- Itens de qualidade: cor e turbidez.

5.3 Evaporação

A evaporação consiste na concentração do material dissolvido no caldo de cana pela retirada parcial da água. O seu objetivo é elevar a concentração do caldo para valores ao redor de 60% m/m, quando ele passa a ser denominado de xarope.

A boa condução da evaporação tem uma grande importância, especialmente nos aspectos de qualidade do produto e da eficiência térmica do sistema produtor de álcool e açúcar.

O balanço de massa da evaporação parte do princípio que a massa do soluto, por não ser volátil, permanece constante durante o processo e que sua quantidade é proporcional à massa de caldo multiplicada pela concentração:

$$M_i \cdot C_i = M_f \cdot C_f$$

$$M_f = M_i \cdot \frac{C_i}{C_f}$$

em que:

M_i : massa inicial do produto em kg;

C_i : concentração inicial do produto em %;

M_f : massa final do produto em kg;

C_f : concentração final do produto em %.

A quantidade de água a ser evaporada (E) pode ser calculada pela diferença entre a massa de caldo inicial e a massa de xarope gerado:

$$E = M_i - M_f$$

$$E = M_i - M_i \cdot \frac{C_i}{C_f} = M_i \cdot \left(1 - \frac{C_i}{C_f} \right)$$

Como exemplo, considera-se 1.000 kg de caldo de cana com uma concentração de 15% de sólidos dissolvidos que se pretende elevar para 60% por evaporação. Assim, tem-se:

$$\text{Massa final do produto} = 1.000 \cdot \frac{15}{60} = 250 \text{ kg}$$

$$\text{Água evaporada} = 1.000 - 250 = 750 \text{ kg}$$

A evaporação do caldo tratado nas usinas de açúcar e destilarias de álcool é realizada pelo sistema de múltiplo efeito, no qual cinco caixas evaporadoras são acopladas em série, como pode ser visto na Figura 5.1.

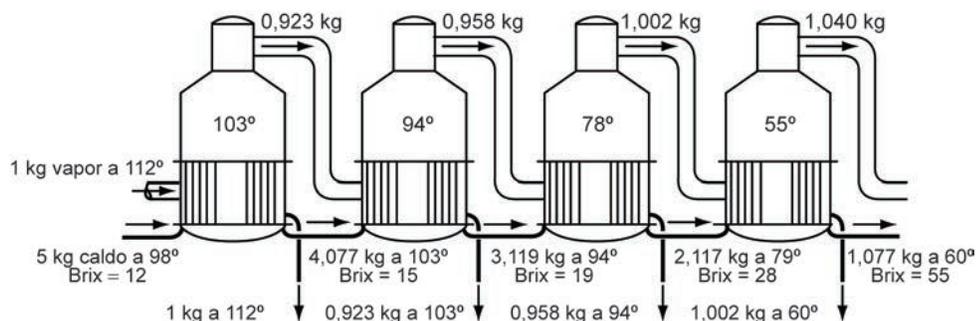


Figura 5.1 Evaporação em múltiplo efeito.

Nas evaporações em múltiplo efeito utilizadas nas usinas de açúcar, adota-se como procedimento para economizar energia a retirada de parte do vapor vegetal gerado no primeiro efeito, para uso no aquecimento do caldo, por exemplo. Esse vapor retirado é conhecido como “sangrado” e pode ser retirado também da segunda e terceira caixas evaporadoras, mas esse procedimento não é comum no país. Na Figura 5.2, é apresentada uma representação esquemática de uma evaporação em quatro efeitos com retirada de vapor na primeira caixa.

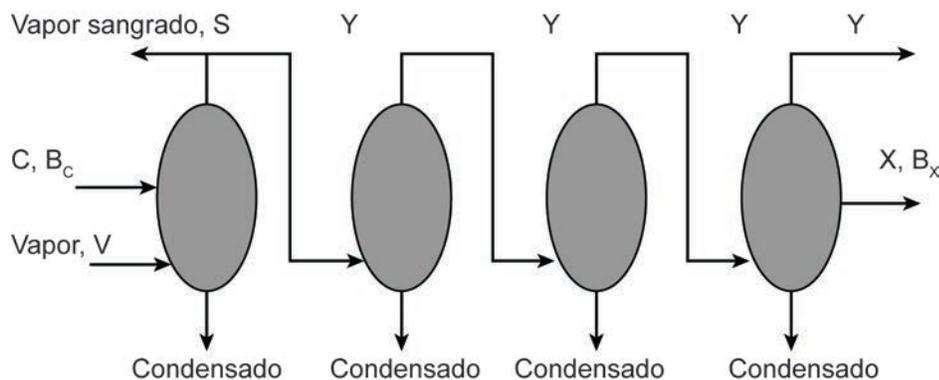


Figura 5.2 Evaporação em múltiplo efeito com sangria de vapor. Notações adotadas.

O cálculo dos evaporadores tem por objetivo inicial estimar os fluxos de líquidos entre as caixas e de vapor consumido e gerado. Com esses valores, pode-se dimensionar os equipamentos, especialmente no que diz respeito à superfície de troca térmica dos corpos. Para que isso seja realizado, é necessário fazer algumas definições iniciais como:

- o número de efeitos;

- quantificar o volume de vapor sangrado e o(s) corpo(s) de onde ele será retirado;
- a vazão mássica e a concentração do caldo clarificado;
- a concentração do xarope gerado;
- o tipo de evaporação a ser utilizada (Roberts, de placas, etc.).

A demanda de vapor de escape pela evaporação pode ser calculada da seguinte forma:

- Produção de xarope:

$$X = J \cdot \frac{B_J}{B_X}$$

em que J e B_J são, respectivamente, a vazão de caldo misto e a sua concentração, e B_X a concentração do xarope. A quantia de água a ser evaporada (E) será:

$$E = J - X = J - J \cdot \frac{B_J}{B_X}$$

$$E = J(1 - B_C/B_X)$$

A quantia total de água evaporada pode ser calculada em função da quantia média evaporada por efeito (Y), do número de efeitos (n) e da quantia de vapor sangrado:

$$E = n Y + S \longrightarrow Y = \frac{(E - S)}{n}$$

Considerando que o vapor seja sangrado somente da primeira caixa evaporadora (caixa de pré-evaporação), conclui-se que o total de vapor vegetal requerido é de (V):

$$V = S + Y = S + \frac{(E - S)}{n}$$

$$V = \frac{(nS + E - S)}{n} = \frac{[E + S(n - 1)]}{n}$$

Cálculo da demanda de vapor na evaporação (V):

$$V = \frac{[E + S(n - 1)]}{n}$$

$$V = \frac{[C(1 - B_C/B_X) + S(n - 1)]}{n}$$

Como exemplo, considera-se uma evaporação composta por uma caixa de pré-evaporação seguida de um quádruplo efeito ($n = 4 + 1 = 5$) que processa (C) 1.000 kg/h de caldo (± 1 t de cana/h) a 16 °Brix (B_C), que é evaporado gerando um xarope (B_X) a 60 °Brix. Na caixa de pré-evaporação é “sangrado” (S) 120 kg/h de vapor para os aquecedores de caldo. Calcular o vapor consumido na evaporação (V).

$$V = \frac{[C(1 - B_C/B_X) + S(n - 1)]}{n}$$

$$V = \frac{[1.000(1 - 16/60) + 120(4 + 1)]}{5}$$

$$V = 267 \text{ kg/h}$$

5.4 Cristalização da sacarose

O setor de cozimento é onde a sacarose contida na cana passa para o estado cristalino, gerando o produto final, que é o açúcar comercial. A cristalização pode ocorrer por meio de diversos sistemas denominados de duas massas ou de três massas, dependendo do grau de esgotamento do mel que se deseja. Em nosso país, o sistema mais utilizado é o de duas massas, como apresentado na Figura 5.3.

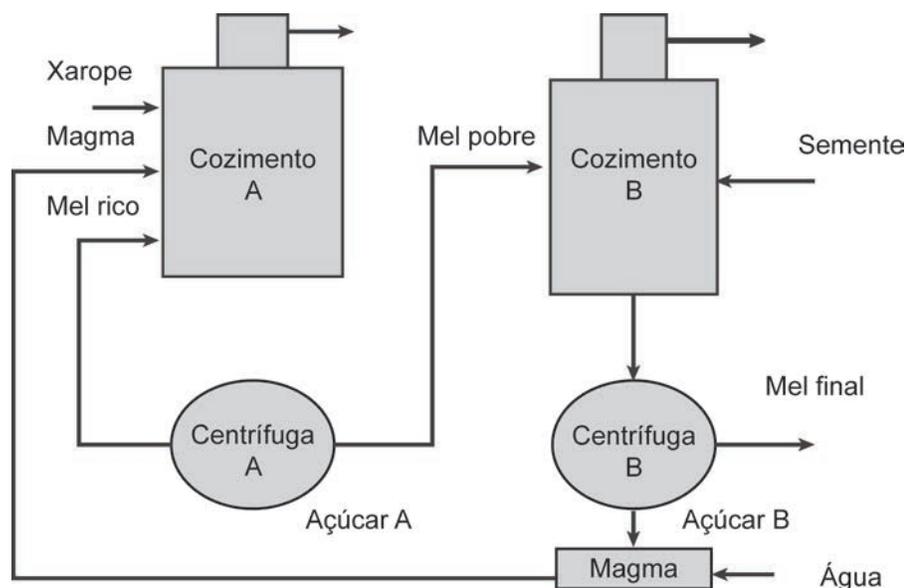


Figura 5.3 Cozimento em duas massas.

O controle do sistema de cozimento é de fundamental importância para o bom desempenho da usina de açúcar, e os itens monitorados são:

- Brix das massas e méis;
- pureza das massas e méis;
- queda de pureza;
- conteúdo de cristais.

Durante o cozimento, devido à deposição da sacarose sobre os cristais, a pureza (relação entre a pol e o Brix) vai diminuindo, e a sua queda é tanto maior quanto menor for a pureza da massa cozida, conforme se pode ver na tabela a seguir, na qual são apresentados os valores desejáveis para essa queda:

Tabela 5.1 Diminuição da pureza da massa em função da sua pureza inicial.

Pureza da massa %	Queda mínima de pureza desejável %
85	15
80	20
70	20
60	22

O cálculo de grandezas, como a recuperação teórica de sacarose e o conteúdo de cristais na massa cozida, é realizado fazendo uso dos recursos de balanço de massa com as notações apresentadas na Figura 5.4.

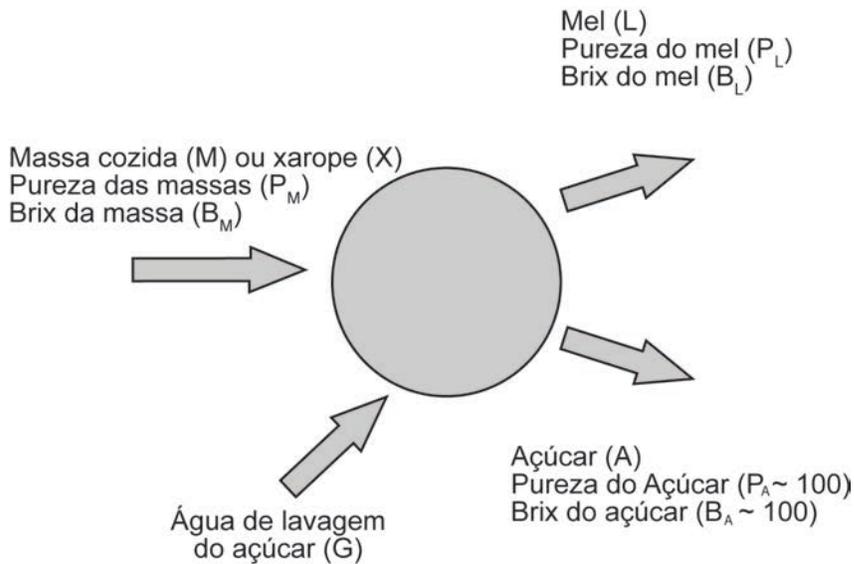


Figura 5.4 Fluxograma do processo de cozimento com as notações utilizadas.

Balanco geral de massa do cozimento:

$$X + G = L + A$$

Balanco de Brix:

$$XB_X = LB_L + AB_A$$

Balanco de sacarose (pureza):

$$XB_X P_X = LB_L P_L + AB_A P_A$$

A recuperação do cozimento é a grandeza que indica o quanto do total de sacarose no xarope foi efetivamente cristalizado, conforme a expressão a seguir:

$$\text{Recuperação}(r) = 100 \cdot \frac{\text{Sacarose ensacada}}{\text{Sacarose no xarope}}$$

Essa expressão pode ser representada algebricamente como:

$$r = 100 \frac{100(P_X - P_L)}{P_X(100 - P_L)}$$

ou

$$r = 100 \frac{S(J - M)}{J(S - M)}$$

Essa expressão é mais conhecida como fórmula SJM, em que S é a pureza do açúcar, J a pureza do xarope, e M a pureza do mel:

$$r = 100 \frac{S(J - M)}{J(S - M)}$$

Outra grandeza para o acompanhamento do cozimento é o conteúdo de cristais na massa, que corresponde à porcentagem de cristais de sacarose existentes em seu interior. A massa cozida é formada por cristais e pelo mel, que preenche o espaço intercrystalino, mais certa quantia de mel que permite a fluidez da massa. O cálculo do conteúdo de cristais na massa é realizado seguindo o mesmo raciocínio usado na determinação da recuperação (r), mas utilizando a pureza da massa cozida e a pureza do mel, conforme a expressão a seguir:

$$C. \text{ cristais \% Brix} = 100 \cdot \frac{\text{Pur. massa} - \text{Pur. mel}}{\text{Pur. açúcar} - \text{Pur. mel}}$$

$$C. \text{ cristais \% massa} = \text{Brix massa} \cdot \frac{\text{Pur. massa} - \text{Pur. mel}}{\text{Pur. açúcar} - \text{Pur. mel}}$$

Massas bem trabalhadas apresentam os seguintes conteúdos de cristais:

Massa A: 50 a 55%

Massa B: 40 a 45%

Massa C: 35%

Quando são encontrados valores muito aquém dos indicados acima, deve-se fazer um minucioso estudo da operação de cozimento para melhorar a sua eficiência.

O processo de cristalização da sacarose nas usinas de açúcar e o denominado granagem por sementeamento, no qual a massa cozida é concentrada por evaporação até uma supersaturação na região metaestável do gráfico de solubilidade, quando são inoculados microcristais de sacarose que crescem até o tamanho desejado.

Como existe uma relação direta entre a massa da semente e a massa de açúcar, que estão entre si assim como a relação entre o cubo do tamanho da semente e o cubo do tamanho do açúcar produto final, a massa da semente (m_s) pode então ser calculada da seguinte forma:

$$\frac{m_s}{m_a} = \frac{d_s^3}{d_a^3} \Rightarrow m_s = m_a \left(\frac{d_s}{d_a} \right)^3$$

em que:

m_s : massa da semente;

m_a : massa do açúcar;

d_s : tamanho dos cristais da semente;

d_a : tamanho dos cristais do açúcar.

A quantidade de semente necessária pode então ser calculada pela expressão:

$$m_a = V_c \cdot d_{mc} \cdot t_c$$

em que:

m_a : quantidade de açúcar a ser produzida em kg;

V_c : volume do cozedor em litros;

d_{mc} : densidade da massa cozida em kg/litro;

t_c : teor de cristais na massa em decimal.

Substituindo, tem-se:

$$m_s = V_c \cdot d_{mc} \cdot t_c \left(\frac{d_s}{d_a} \right)^3$$

Na prática, utiliza-se uma quantia de semente maior que a calculada teoricamente, em geral o dobro, para compensar a “mortalidade” das sementes, pois uma fração dos microcristais acaba sendo dissolvida, não chegando ao tamanho comercial.

5.5 Rendimento de uma usina com destilaria

Uma usina geralmente produz açúcar e mel residual, ou mel esgotado, destinado para a produção de álcool junto com parte do caldo misto desviado do sistema de extração. Originalmente, quando todo o caldo misto era destinado para a produção de açúcar, o cálculo do rendimento era obtido dividindo os quilogramas de açúcar produzidos pelas toneladas de cana processadas. Com a prática do desvio de caldo misto para a destilaria, esse tipo de cálculo deixou de ter sentido.

A eficiência industrial das unidades que desviam parte do caldo misto para a produção de álcool, ou mesmo que não esgotam o mel durante o cozimento, necessita de uma correção. Assim, surgiram várias sistemáticas para realizar a correção do cálculo do rendimento, no geral, transformando o álcool em seu equivalente em açúcar. As principais fórmulas são apresentadas a seguir.

A mais antiga das fórmulas é o Rendimento Industrial Corrigido (RIC-IAA), cuja fórmula foi proposta pelo órgão governamental Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), fundamentada na pressuposição de que a produção de um saco de 60 kg de açúcar cristal equivale a 33,75 litros de álcool anidro mais 7 litros gerados pelo melaço produzido (álcool residual), ou seja, 40,75 litros. Essa relação considera um rendimento estequiométrico de fermentação de 82,75%.

Essa conversão de álcool em açúcar resulta em kg de açúcar equivalente por t de cana, sendo a expressão a seguinte:

$$\text{RIC-IAA (kg/t)} = 0,8281 \cdot \text{RA} + 1,4728 \cdot \text{RE}$$

Essa fórmula deve ser utilizada somente quando a produção de etanol for maior que 7 litros por saco de 60 kg de cristal "standard". Na fórmula pode-se considerar:

- RA (Rendimento em açúcar): todo açúcar produzido é convertido em açúcar com polarização 99,7 °Z e expresso em kg. Esse valor é dividido pela cana esmagada em tonelada, resultando no RA em kg/t.
- RE (Rendimento em álcool): todo álcool produzido é convertido em álcool 99,3 °INPM, se somando todo mel, melaço e levedura convertidos em etanol 99,3 °INPM. Esse valor em litros, dividido pela cana esmagada em toneladas resulta no RE em litros/t.

A expressão para o cálculo do RIC-IAA foi utilizada por muito tempo em nosso país, mas apresenta como restrição a utilização da pressuposição do

rendimento da fermentação como sendo de 82,75%, valor este bastante subestimado para os dias atuais e que causa distorções no valor calculado. Assim, outras expressões foram propostas, como a denominada RIC-STAB, desenvolvida pela Sociedade dos Técnicos Açucareiros do Brasil, que propunha uma pressuposição do rendimento da fermentação de 90% para a conversão de álcool em açúcar, resultando na expressão:

$$\text{RIC-STAB} = 0,867 \cdot \text{RA} + 1,416 \cdot \text{RE}$$

Existem outras fórmulas para o cálculo do rendimento industrial corrigido, como a proposta pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em que a correção é feita utilizando o rendimento da fermentação da própria usina, e não um valor arbitrário:

$$\text{RIC-UFSCar} = 0,8281 \cdot \text{RA} + 1,2255 \cdot \frac{\text{RE}}{r}$$

em que r é o rendimento estequiométrico em fração decimal.

UNIDADE 6

Açúcar e álcool: classificação

6.1 Açúcar

Açúcar é a designação genérica para a sacarose cristalizada ou em solução (açúcar líquido). O açúcar é produzido sob diversas características e aspectos em função de suas diferentes tecnologias de fabricação, aplicações industriais, usos domésticos, etc. De forma geral, pode-se classificar os diferentes açúcares nas seguintes categorias:

- Açúcares artesanais: produzidos em pequenas unidades, sem grande aporte de tecnologia, como o açúcar mascavo, a rapadura, o mel de cana ou melado, etc.
- Açúcares brutos (*raw sugars*): não destinados ao consumo humano direto, mas a serem reprocessados em unidades de refino de açúcar. Os produtos que se classificam nessa categoria são o demerara e o VHP.
- Açúcares brancos diretos de usina (*plantation white sugar*): açúcares brancos que, em nosso país, são clarificados pelo processo de sulfitação e cujo destino é o consumo humano direto ou como insumo de indústria de refrigerante ou alimentos. Os principais representantes dessa categoria são os diversos tipos de açúcar cristal.
- Açúcar refinado: açúcar branco produzido em refinaria que processa o açúcar demerara, VHP ou mesmo cristal de baixa qualidade. Seu destino é o consumo humano doméstico ou como insumo para indústrias de alimentos doces. Pode-se dividir esse tipo de açúcar em duas subcategorias, que são o refinado granulado e o refinado amorfo.
- Refinado amorfo: tipo de açúcar refinado consumido amplamente no Brasil, mas praticamente desconhecido no resto dos países, exceto Portugal e algumas províncias da Índia. Sua denominação mais correta é açúcar refinado microcristalino. Sua produção utiliza como matéria-prima açúcar cristal ou VHP e seu destino é o consumo humano como adoçante residencial.
- Açúcar refinado granulado: tipo de açúcar branco produzido em refinarias e de utilização tanto residencial como industrial. É o refinado típico consumido em quase todos os países do globo. No Brasil, esse tipo de açúcar é produzido para atender, em sua maioria, o mercado externo.
- Açúcar de confeitiro (glaçúcar): tipo de açúcar refinado, de granulometria muito fina, que vem acompanhado de 2% de amido, para não empedrar, e que é destinado à confecção de bolos, glacês, chantilly, etc.
- Açúcar líquido: açúcar resultante da dissolução de açúcar até uma solução com 65 a 70 °Brix, que é descolorada e purificada.

- Açúcar líquido invertido: xarope produzido a partir de um açúcar granulado que é dissolvido em água e invertido, formando uma solução acima de 75 °Brix.

6.2 Álcool

Álcool é a designação genérica dada a uma classe de compostos orgânicos de fórmula geral R-OH, em que R é um grupo alquil substituído. Os alcoóis podem ser classificados quimicamente em primários, secundários e terciários quando o grupo OH está ligado a, respectivamente, um carbono primário, secundário e terciário. Pode ser fabricado por via bioquímica, ou seja, por meio da fermentação de açúcares presentes em diferentes fontes vegetais, ou pela via química, principalmente a partir da hidratação do etileno, cujo produto, neste segundo caso, apresenta utilização restrita, não podendo ser utilizado em alimentos, bebidas, fármacos ou cosméticos. O álcool produzido a partir da cana-de-açúcar tem como grupo “R-” o “etil”, tratando-se, dessa forma, do composto etanol.

O etanol é um líquido incolor de odor ardente, inflamável e higroscópico. Quando puro, é perfeitamente solúvel em muitos compostos orgânicos, mas a solubilidade diminui com o aumento da presença de água. Em presença de cloreto, forma o aldeído etílico (acetaldeído). Dissolve com alguma facilidade os sulfatos, carbonatos, cloretos e acetatos de potássio, mas não os de sódio. Suas propriedades e características físico-químicas ajudam a estabelecer seus usos, bem como a verificar sua qualidade.

Tabela 6.1 Características físico-químicas do etanol puro.

Fórmula molecular	CH ₃ CH ₂ OH
Massa molecular	46,07
Estado e cor	Líquido, incolor
Ponto de fusão	-112 °C
Densidade	0,7894 a 20/4 °C; e 0,7942 a 15/4 °C
Ponto de ebulição	78,4 °C
Massa específica a 20 °C	0,7893 g/cm ³ a 20 °C
Solubilidade em água	Solúvel em todas as proporções
Ponto de fulgor	13,0 °C
Índice de refração	1,3610 a 20 °C
Limite de explosividade no ar	Inferior a 3,7% vol; e superior a 13,7% vol.
Temperatura de autoignição	371 a 427 °C
Calor específico a 0 °C	0,548 kcal; e a 20°C é 0,615 kcal

Na produção do etanol, alguns outros alcoóis também são formados, como o metanol, o propanol, o isopentanol (isoamílico), no entanto, em quantidades muito pequenas. Diferentes matérias-primas fornecem produtos com composições diferentes, por exemplo, matérias-primas ricas em pectina fornecem álcool rico em metanol. O etanol produzido em destilarias autônomas, nas quais a matéria-prima é o caldo-de-cana, também apresenta composição diferente do etanol produzido em destilarias anexas em que a matéria-prima é o melaço oriundo da produção do açúcar.

O álcool produzido por fermentação alcoólica do caldo de cana-de-açúcar é separado após sua produção, por destilação. Ele é concentrado na coluna de retificação, em que os vapores alcoólicos vão sendo enriquecidos em etanol até atingir um ponto em que não é mais possível concentrá-lo, pois os vapores produzidos passam a ter a mesma concentração da fase líquida. Esse ponto é chamado de azeótropo e corresponde a uma mistura hidroalcoólica de concentração máxima em etanol de 97,1% em volume (%v/v), que equivale a 95,5% de etanol massa/massa. Para remover o restante de água da mistura é necessário proceder a desidratação. Os principais processos atualmente utilizados nessa desidratação são:

- a) por meio da adição de um terceiro componente, como o cicloexano, que irá formar um outro azeótropo com ponto de ebulição mais baixo; nesse caso teremos uma destilação azeotrópica;
- b) por meio da adição de etileno glicol ou glicerina; nesse caso promove-se uma destilação extrativa;
- c) por meio da separação da água pela passagem da solução hidroalcoólica por uma coluna de adsorção constituída de zeólita, chamada de peneira molecular, em que a água é adsorvida e depois removida da zeólita por aplicação de vácuo.

6.2.1 Classificação do etanol

O etanol é largamente utilizado em diversos segmentos industriais como parte integrante do produto ou no auxílio da produção, na indústria alimentícia, química, farmacêutica, de cosméticos, entre outras. As impurezas presentes caracterizam o tipo de álcool. A formação do azeótropo na coluna de retificação determina a existência de duas classes de álcool: o álcool hidratado, também chamado de bruto, e o álcool anidro, também chamado de álcool absoluto, obtido da desidratação do álcool bruto.

A classificação dos diferentes tipos de etanol se apresenta em função do uso, do teor alcoólico e da pureza. A classificação feita com enfoque no uso é conveniente em função da comercialização. Com esse enfoque, o etanol pode ser dividido em duas classes: para uso combustível e para outros fins. Assim, temos:

- a) Etanol para fins combustíveis ou carburantes: Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) e Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC).
- b) Etanol para outros fins: Álcool Etílico Hidratado Industrial (AEHI), Álcool Etílico Anidro Industrial, (AEAI), Álcool Etílico Refinado ou retificado (AER), que pode ser ainda subdividido em Álcool Etílico Fino (AEF), Extrafino (AEEF), Neutro (AEN), Desnaturado e para uso hospitalar.

Não existe uma especificação mundial para os diferentes tipos de etanol, e isso gera divergências entre importadores e exportadores, além de possíveis barreiras técnicas que muitas vezes prejudicam a comercialização. As especificações para cada tipo de álcool hidratado e anidro dependem da aplicação. As especificações e normas analíticas para o etanol, para fins como mercado externo, bebidas, fármacos, etc., são estabelecidas de maneira geral pelos usuários. No caso do álcool hidratado e anidro para fins combustíveis, as especificações são estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), e as metodologias analíticas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

6.2.2 Especificações

O álcool apresenta em sua composição ácidos orgânicos, especialmente o acético e às vezes ácidos minerais como o sulfúrico e o sulfídrico. Dentre os aldeídos presentes, o principal é o aldeído etílico, também chamado de acetaldeído ou aldeído acético, mas podem estar presentes também, em quantidade bem reduzida, aldeídos de maior peso molecular e o furfurool. Encontram-se também, no álcool, ésteres, que são resultantes da combinação do álcool com diversos ácidos, sendo o mais encontrado o acetato de etila. Como já foi dito, outros alcoóis estão presentes, e a concentração total destes pode atingir a faixa de 0,2 a 0,5%, sendo os principais os propílicos, os butílicos e o isoamílico. Apresentamos a seguir especificações para diversos tipos de álcool, o que não implica dizer que não possa aparecer usuários com diferentes exigências de especificação.

6.2.2.1 Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC)

O Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) é definido como o álcool produzido no país ou importado pelos agentes econômicos autorizados, utilizado

em mistura com “gasolina A” para formulação da “gasolina C”. As especificações de alcoóis para fins combustíveis são apresentadas no Regulamento Técnico ANP nº 7/2005 (BRASIL, 2011). A ANP fiscaliza o produto a partir da saída da destilaria até a comercialização nos postos de venda. Com os esquemas de fiscalização que foram construídos, os problemas de adulteração foram minimizados. Obrigatoriamente, um certificado de qualidade do álcool, expedido pelo produtor, acompanha o produto saído das unidades para qualquer fim, e representa a garantia do fabricante de que o álcool está de acordo com as especificações. A legislação brasileira estabelece um mínimo de 99,3 oINPM, equivalente a 99,6% v/v; essa especificação se baseia no valor médio geralmente obtido nas destilarias. Já as especificações americanas estabelecem para o álcool anidro utilizado em adição à gasolina um grau alcoólico mínimo de 99,0% v/v. Ao que parece, esse limite foi estabelecido baseando-se em estudos de equilíbrio entre as misturas gasolina, etanol e água. A legislação brasileira apresenta uma especificação rígida e que encarece a produção do etanol. Vale lembrar que o valor do teor alcoólico em INPM é somente utilizado no Brasil. A sigla significa Instituto Nacional de Pesos e Medidas, instituição já extinta. A unidade é interessante pois representa o valor real em gramas de álcool que está sendo comercializando. Dessa forma tem-se estudado o abandono do uso do grau INPM e substituí-lo pela unidade % m/m.

Segundo o Regulamento Técnico ANP nº 7/2005 contido na Resolução ANP nº 36, de 6 de dezembro de 2005 (BRASIL, 2011), o produtor deve apresentar os resultados dos seguintes itens analíticos para o AEAC:

Tabela 6.2 Especificações técnicas ANP para AEAC.

Característica ou requisito	Unidade	Especificação	Metodologia
Acidez total (máx. expressa em ácido acético)	mg/L	30	NBR 9866
Aspecto		Límpido e isento de material em suspensão	Visual
Condutividade elétrica (máx.)	µS/m	500	NBR 10547
Cor		Incolor	Visual
Massa específica a 20 °C (máx.)	kg/m ³	791,5	NBR 5992
Cobre	mg/kg	0,07	MB 3054
Resíduos por evaporação (máx.)	mg/L	5	NBR 8644
Teor alcoólico (mín.)	INPM	99,3	NBR 5992
Teor de etanol (mín.)*	% vol.	99,6	D 5501
Teor de hidrocarbonetos	% vol.	3	NBR 13993

* Requerido quando o álcool não for produzido por via fermentativa a partir da cana-de-açúcar ou em caso de dúvida quando da possibilidade de contaminação por outros tipos de alcoóis.

Fonte: adaptada de Brasil (2011).

6.2.2.2 Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC)

O Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC) é definido como o álcool produzido no país ou importado pelos agentes econômicos autorizados, utilizado como combustível em motores de combustão interna de ignição por centelha. O Álcool Etílico Hidratado usado como combustível tem suas especificações regulamentadas pela mesma norma descrita anteriormente, a Resolução Técnica ANP nº 7/2005 (BRASIL, 2011). De forma geral o item mais crítico é o teor alcoólico, que pode ser verificado por meio da massa específica. Essas especificações se aplicam na importação, distribuição e revenda, e os itens especificados são os seguintes:

Tabela 6.3 Especificações técnicas ANP para AEHC.

Característica ou requisito	Unidade	Especificação	Metodologia
Acidez total (máx. expressa em ácido acético)	mg/L	30	NBR 9866
Ânions Sulfato (máx.) Cloreto (máx.)	mg/kg mg/kg	4 1	NBR 10894/12120 NBR 10894/10895
Aspecto		Límpido, incolor e isento de material em suspensão	Visual
Condutividade elétrica (máx.)	µS/m	500	NBR 10547
Cor		Incolor	Visual
Massa específica a 20 °C (máx.)	kg/m ³	807,6 a 811,0	NBR 5992
Metais Ferro Sódio	mg/kg mg/kg	5 2	NBR 11331 NBR 10422
Potencial de hidrogênio (pH)	-log [H ⁺]	6,0 a 8,0	NBR 10891
Resíduos por evaporação (máx.)	mg/100ml	5	NBR 8644
Teor alcoólico (mín.)	INPM	92,6 a 94,7	NBR 5992
Teor de Etanol (mín.)*	% vol.	95,1	ASTM D5501
Teor de hidrocarbonetos	% vol.	3	

* Requerido quando o álcool não for produzido por via fermentativa a partir da cana-de-açúcar ou em caso de dúvida quando da possibilidade de contaminação por outros tipos de alcoóis.

Fonte: adaptada de Brasil (2011).

6.2.2.3 Álcool Etílico Anidro Industrial (AEAI)

O Álcool Anidro, como foi dito, é o álcool de maior graduação alcoólica, e pode ser utilizado em muitas aplicações industriais como: reativos, solventes, fabricação de inseticidas (aerossóis), fabricação de repelentes de insetos, desodorantes de ambientes, fungicidas, etc. As especificações para esse álcool depende de cada usuário. Não existe uma padronização de metodologia como existe para os alcoóis usados como combustíveis. Os usuários podem definir as metodologias a serem utilizadas ou usar a NBR ou normas internacionais, como

as da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Algumas especificações como cor APHA, aspecto, BTX, pH ou até a presença de cobre, entre outras, são às vezes solicitadas por usuários específicos. De maneira geral temos o que segue em função de diferentes usuários nacionais e de países europeus.

Tabela 6.4 Especificações técnicas usuais para AEAI.

Característica ou requisito	Unidade	Especificação
Acidez total (máx. expressa em ácido acético)	mg/l	30
Alcoóis superiores em álcool isoamílico (máx.)	mg/100ml	45
Álcool metílico (metanol)	mg/100ml	8
Acetal	mg/100ml	10
Aldeídos em aldeído acético (acetaldeído)	mg/100ml	12
Benzeno		Isento (deve estar abaixo do limite de detecção)
Cicloexano		Isento (deve estar abaixo do limite de detecção)
Condutividade elétrica	µS/m	500
Crotonaldeído (máx.)	mg/l	< 0,5
Ésteres em acetato de etila (máx.)	mg/100ml	15
Massa específica a 20 °/20 °C (máx.)	kg/m ³	791,5
Resíduos por evaporação (máx.)	mg/100ml	4 – 5
Teor de etanol a 20 °C (mín.)	INPM	99,3
1-propanol (máx.)	mg/100 ml	2

6.2.2.4 Álcool Etílico Hidratado Industrial (AEHI)

O Álcool Hidratado Industrial tem uma grande variedade de usos. Quando o álcool é destinado a aplicações com especificações menos rígidas, como indústrias de tintas, vernizes, produtos de limpeza, indústria têxtil e de insumos para fundições, ele pode ser desnaturado adicionando-se substâncias que não o desqualificam para o uso industrial, mas que não permitem que ele seja utilizado para o consumo humano. Essas substâncias são, por exemplo, gasolina, iodo, metanol, ácido acético, entre outros. Quando o álcool é destinado a produtos com aplicações mais nobres, como produção de fármacos, extração de produtos medicinais, fabricação de vacinas, antibióticos, preparo de antissépticos, indústria de bebidas (vodca, licores, gim), na indústria de perfumes (solvente de aromas e cosméticos),

as exigências são maiores pois a qualidade físico-química do etanol torna-se de grande importância na qualidade dos produtos fabricados. Os itens mais controlados no segundo caso são o metanol, a acidez, a presença de alcoóis superiores como o isoamílico, aldeídos, e outras substâncias ditas carbonizáveis não voláteis, como pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 6.5 Especificações técnicas usuais para AEHI.

Característica ou requisito	Unidade	Especificação
Acidez total (expressa em ácido acético)	mg/l	30
Alcoóis superiores em álcool isoamílico	mg/l	60
Álcool metílico	mg/l	2 – 50
Aldeídos em aldeído acético	mg/l	60
Aspecto		Límpido e isento de material em suspensão
Condutividade elétrica	µS/m	300 – 500
Ésteres em acetato de etila	mg/l	80
Massa específica a 20 °/20 °C	kg/m ³	805,5 – 811,0
Materiais não voláteis a 105 °C	mg/k	5
Teor de etanol (mín.)	INPM	92,6
Teor de etanol (mín.)	% vol.	96,0
Reação Barbet (mín.)	minutos	10

6.2.2.5 Álcool Etílico Refinado

O álcool etílico hidratado pode ser refinado e pode ter outras classificações em função do grau de pureza: fino, extrafino e neutro para a indústria. Quem estabelece os limites são os consumidores; por isso apresentamos especificações que podem ser ligeiramente diferentes em função de usos específicos. Esses alcoóis são destinados a aplicações nobres, como fabricação de produtos destinados aos humanos e animais. As exigências são maiores quanto à isenção de aldeídos, ésteres, alcoóis superiores, entre outros, além da baixa acidez. Seu odor é suave e agradável, sendo usado também nas indústrias de bebidas. A eliminação dessas impurezas é realizada por meio da destilação extrativa (hidrosseleção), em refinarias de álcool.

O álcool hospitalar é o etanol comercializado com menor teor alcoólico e também é chamado de álcool 70 °GL. Tem como principais aplicações o uso na desinfecção de superfícies fixas de ambientes hospitalares e estabelecimentos relacionados com o atendimento à saúde como pisos, paredes, mobiliários, etc. É

uma solução límpida, incolor, de odor característico e sabor ardente. O teor alcoólico deve estar entre 68 e 72 °GL, como pode ser observado na tabela a seguir.

Tabela 6.6 Especificações técnicas usuais para AER.

Característica ou requisito	Unidade	Fino	Extrafino	Neutro	Hospitalar
Acidez total	mg/l	12-18	10-15	5-10	máx. de 0,9 ml de NaOH 0,02M
Alcoóis superiores em álcool isoamílico	mg/l	10	Amarelo claro para amarelo	5-10	Não deve aparecer coloração vermelha ou marrom
Álcool metílico	mg/l	40	2	10	
Aldeídos em aldeído acético	mg/l	40-60	10-40	5-10	
Esteres em acetato de etila	mg/l	50-100	20-80	5-20	
Materiais não voláteis a 105 °C	mg/l	10	5	10	A mistura deve permanecer clara
Massa específica a 20 °C	g/ml			0,8071 máx.	
Reação Barbet a 20 °C	mín.	5-15	20-35	30-40	
Teor de etanol (mín.)	% vol.	94,2-96,2	94,2-96,1	96,1	68,0-72,0
Aspecto		Líquido, límpido e incolor			
pH				6-8	5,5-8,0
Condutividade (máx.)	µS/m			50	
Absorbância (máx.)	220 nm 230 nm			0,30 0,18	

6.2.3 Itens de especificações

6.2.3.1 Acidez

A acidez do etanol tem origem principalmente na fermentação. É constituída por ácidos orgânicos, cuja principal fonte é a fermentação acética, que ocorre paralelamente à fermentação etanólica em função de contaminações. Alguns autores indicam a possibilidade de arraste, até o etanol, de ácido sulfúrico utilizado no tratamento da levedura. Uma destilação tumultuosa pode acabar por arrastar este ácido para o destilado. A acidez do álcool é responsável pela reação desses ácidos com alcoóis, reações de esterificação.

A acidez é determinada por meio da titulação, com hidróxido de sódio 0,02M, de todos os ácidos presentes na amostra. Utiliza-se como indicador dessa titulação o α -naftoftaleína. Caso o ponto final seja feito utilizando um potenciômetro, a titulação deve ser conduzida até pH 9,0. O resultado deve ser expresso em acidez acética. Eventualmente encontramos os resultados expressos em acidez sulfúrica, embora seja raro. Para converter para ácido acético basta multiplicar pelo fator $60/49 = 1,2245$, obtendo-se assim acidez acética.

Raramente o álcool apresenta alcalinidade. Caso esta esteja presente significa que foi acrescentada. A alcalinidade é facilmente observada, pois na adição do indicador ou na introdução do eletrodo para realização da titulação, ela já será indicada.

6.2.3.2 Alcoóis superiores

A determinação do teor de alcoóis superiores não é importante para etanol com fins combustíveis e, por isso, não é requerida nesses casos. A determinação de alcoóis superiores é importante quando a finalidade do etanol é alimentícia, para fármacos e cosméticos. Os alcoóis superiores presentes no etanol são alcoóis com três ou mais carbonos, principalmente os propílicos, os butílicos e os pentílicos que, como já foi dito, são formados durante a fermentação alcoólica e pela decomposição de células de levedura. Geralmente expressamos a soma desses alcoóis e em termos de álcool isoamílico.

A melhor metodologia para determinação é por cromatografia gasosa. Nesse caso, todos os componentes voláteis presentes são separados durante a passagem por uma coluna cromatográfica e quantificados ao passarem por um detetor. Para o uso farmacêutico geralmente a metodologia utilizada é química. Esse segmento de usuários do etanol geralmente usa kits para avaliação

presuntiva da qualidade do etanol. A presença de amílicos e substâncias carbonizáveis não voláteis é investigada evaporando a amostra até obtenção de um resíduo úmido que é colocado para reagir com ácido sulfúrico. Sua detecção é visual por meio da formação de cor. Imediatamente após a adição do ácido sulfúrico não deve ser produzida coloração vermelha ou marrom. Se houver a necessidade de quantificação, o procedimento deverá ser o cromatográfico.

6.2.3.3 Álcool metílico (metanol)

Assim como os alcoóis superiores, o metanol ou álcool metílico é produzido durante a fermentação alcoólica, e seus teores dependem da condução da fermentação e da matéria-prima. O melhor método de determinação é o cromatográfico; no entanto, existem testes presuntivos de sua presença, descritos na farmacopeia, que são realizados pelos compradores para fins farmacêuticos, cosméticos e hospitalares.

6.2.3.4 Aldeídos

O principal aldeído encontrado no etanol é o aldeído acético ou acetaldeído. Os aldeídos são produtos de reações bioquímicas intermediárias que ocorrem na fermentação. Sua determinação é feita mais apropriadamente por cromatografia; no entanto, também são utilizados testes presuntivos. Geralmente, faz-se reagir a amostra com permanganato de potássio em meio ácido e observa-se a coloração obtida. A coloração rosa obtida inicialmente não deve desaparecer completa e imediatamente.

6.2.3.5 Acetal

O Acetal, ou Acetaldeído dietil-acetal, possui fórmula molecular $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$ e trata-se de um éter. É o produzido a partir de acetaldeído e álcool em presença de pequenas quantidades de ácidos minerais. Sua determinação é feita por cromatografia gasosa.

6.2.3.6 Ânions

Os principais ânions controlados são o sulfato e o cloreto. A presença do íon sulfato pode indicar uma má condução da destilação, acarretando em um arraste desse íon. A presença do íon cloreto aparece como resultado da neutralização exagerada do álcool.

A determinação desses íons é realizada de maneira mais apropriada por meio da cromatografia de íons. Mas pode também ser realizada por métodos da química clássica, como titulação gravimétrica e também por turbidimetria, métodos preconizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

6.2.3.7 Aspecto

A avaliação do aspecto, presença de cor e de material em suspensão é realizada visualmente. Esse teste deve ser realizado com repetição, pela mesma pessoa ou por pessoas diferentes, em pelo menos três momentos e em local de boa iluminação. A amostra deve ser colocada em frasco transparente e observada com cuidado. Ao agitar o frasco, deve-se observar se é levantada sujidades do fundo e se existem partículas em suspensão. A cor visual também deve ser observada e indicada se incolor ou se apresenta alguma coloração. É possível também efetuar a medida de cor comparando com padrões APHA, que pode ser visual ou instrumental.

6.2.3.8 Barbet

A reação de Barbet, conhecida também como reação do permanganato, tem importância por ser uma boa indicação da presença de impurezas de baixo peso molecular, como o acetaldeído e o metanol. Sua utilização é muito generalizada entre os consumidores de álcool refinado, principalmente quando destinados a fármacos e perfumes. O teste baseia-se no tempo que a amostra demora para descolorir uma solução de permanganato (substância oxidante) nas condições indicadas no método. Quanto maior o tempo, menor a quantidade de substâncias redutoras presentes. Os alcoóis bons devem levar muito tempo, ou seja, mais de 30 minutos.

6.2.3.9 Benzeno

Hoje em dia, o benzeno não deve estar presente em nenhum tipo de álcool, pois o seu uso como agente desidratante está proibido. No entanto, sua presença ainda é controlada, pois trata-se de um hidrocarboneto tóxico. A determinação do benzeno em etanol é realizada por meio da análise cromatográfica. A solicitação muitas vezes é feita em termos de BTX (benzeno, tolueno e xileno). Esses hidrocarbonetos também podem ser identificados na amostra por meio de espectrofotometria no ultravioleta; nesse caso é efetuada uma varredura das absorbâncias na região próxima ao comprimento de onda de 219 nm. A leitura

da absorbância da amostra na região do ultravioleta fornece indicações da presença de outras impurezas, como crotonaldeído ou outros compostos cíclicos ou que contenham duplas ligações.

6.2.3.10 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica indica a presença de íons em solução. A medida é feita em células de condutividade que possuem baixo valor de constante (aproximadamente 0,1) e a temperatura constante de 20 °C. Na maioria das vezes, a condutividade é lida diretamente em condutivímetro, que corrige a leitura feita a temperatura ambiente para a leitura a 20 °C.

6.2.3.11 Ésteres

O etanol contém uma certa quantidade de acetato de etila junto com butiratos e propionatos. O conteúdo se expressa em termos de acetato de etila, e seu teor máximo não deve passar 8 g/L. Sua determinação é feita mais apropriadamente por cromatografia gasosa, mas sua presença pode ser identificada, também, por reações químicas clássicas.

6.2.3.12 Massa específica, densidade e teor alcoólico

A massa específica é a determinação mais importante de comercialização dos diferentes tipos de álcool. Essa medida está diretamente relacionada com o teor alcoólico das soluções hidroalcoólicas. A massa específica ou densidade absoluta (ρ) ou peso específico (w), muitas vezes são confundidos com densidade relativa, pois em inglês é chamada de *density*. Essas duas medidas são respectivamente a massa e o peso da unidade de volume e dependem da temperatura. Simbolizada pela letra grega ρ , a massa específica é a massa dividida pelo volume, ou é a massa de determinado volume da substância em questão, $\rho = m/V$, e w , o peso específico, que é a massa multiplicada pela aceleração da gravidade (g), dividido pelo volume: $w = m \cdot g / V$.

A unidade da massa específica é gramas por centímetro cúbico, no sistema CGS, e quilos por m^3 , no sistema internacional (SI), enquanto a unidade do peso específico é Newton por m^3 .

Quando a medida da massa específica é feita no vácuo, ela recebe o nome de massa específica absoluta, e nesse caso eliminamos o efeito do empuxo do ar.

A comercialização do etanol é feita principalmente sobre o valor da massa específica da mistura hidroalcoólica, que nos fornece a massa real de etanol

que está sendo comprada, já que o volume sofre alteração com a temperatura. Para álcool etílico hidratado combustível, a massa específica deve estar entre 807,6 e 811,0 kg/m³. Por meio de tabelas, correlaciona-se a massa específica com o teor alcoólico INPM, que se trata de porcentagem massa/massa. Para esses valores de massa específica, os valores em INPM são 92,6 a 93,8%

A densidade ou densidade relativa, ou em inglês *specific gravity* (d), é um número absoluto, ou seja, não possui unidade, é adimensional. É a relação entre duas massas específicas. Densidade (d) é a relação entre a massa da substância e a massa de igual volume de uma substância padrão, a uma temperatura padrão, geralmente da água a 4 °C. Como o volume depende da temperatura na qual a densidade foi determinada, esta é representada pelo símbolo d_t^t , em que o expoente é a temperatura da substância, e o índice a temperatura padrão da substância referência. Dessa forma, d_{20}^{20} é a densidade de uma substância a 20 °C em relação à água a 20 °C. A densidade em relação à água a 4 °C é grafada como d_4^{20} .

6.2.3.13 Materiais não voláteis ou extrato seco

O teor de materiais não voláteis a 105 °C muitas vezes é chamado de resíduos após evaporação, resíduo fixo ou extrato seco, e trata-se da determinação da massa do resíduo obtido após evaporação da amostra a 105 °C até que se obtenha peso constante. Essa massa representa os compostos que apresentam ponto de ebulição elevado e que estão solubilizados no etanol, por isso, a determinação deve ser sempre realizada após filtração da amostra. Os resultados são expressos em mg/100 ml.

6.2.3.14 Metais

Os metais presentes no etanol mais comumente investigados são o cobre, o ferro e o sódio, sendo os dois primeiros determinados por espectrofotometria de absorção atômica, e o sódio por fotometria de chama. A presença desses metais está relacionada a contaminações tanto na produção como no transporte e armazenamento.

6.2.3.15 Odor

Principalmente para a indústria de perfumes e bebidas, a investigação do odor é importante. Algumas precauções são necessárias, como efetuar o teste em local isolado e sem odores, apropriado para análise sensorial. Pode-se realizar o teste em três dias diferentes ou por três pessoas diferentes para se verificar a

consistência da observação. O etanol deve apresentar odor agradável e livre de odores estranhos.

6.2.3.16 Potencial de hidrogênio (pH)

A medida do pH é definida para soluções aquosas e, por isso, sua medida em etanol, principalmente em etanol anidro, não é recomendada. A determinação é realizada em potenciômetro normal, porém, como a leitura se torna instável em álcool anidro, utiliza-se um eletrodo que apresenta uma ponte salina contendo, como eletrólito suporte, o cloreto de lítio. O pH neutro do etanol é ao redor de 8, e não 7, como o da água.

6.3 Classificação do açúcar

Os açúcares, para serem classificados nas diferentes categorias em que são comercializados, devem ser amostrados e analisados em diferentes itens analíticos. O açúcar é classificado em uma categoria ou tipo quando atende os itens analíticos que definem essa categoria. Os itens utilizados para classificar os açúcares totalizam algumas dezenas, dos quais os principais são a polarização, a cor, o teor de cinzas, açúcares redutores, etc.

6.4 Polarização do açúcar

A polarização, ou pol, determina o teor de sacarose aparente no produto. A análise é realizada medindo o desvio ótico que uma solução de açúcar provoca numa luz polarizada. A escala internacional de açúcar definida pela *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis* (Icumsa) fixa a unidade da polarização como sendo grau Zucker (°Z). A pol é um dos principais itens classificatórios do açúcar.

Um açúcar para consumo humano direto deve apresentar uma polarização superior a 99,7 °Z, ou seja, apresentar menos de 0,3% de material não sacarose, como água, material mineral, etc. Açúcares com teor de sacarose inferior a 99,5 °Z, excetuando os açúcares artesanais, não são utilizados para o consumo humano direto, mas como matéria-prima para refino.

6.5 Umidade (perda de peso por secagem)

O teor de umidade, ou perda de peso por secagem, em estufa, até um peso constante é o item de qualidade mais importante do açúcar após a polarização.

Esse item é um importante indicador das condições do produto a ser armazenado. Açúcar com alta umidade pode sofrer deterioração nos armazéns, especialmente o empedramento, escurecimento. A umidade também tem uma importância na fluidez do açúcar, já que produtos úmidos tendem a fluir com dificuldade.

A umidade máxima aceitável para um açúcar cristal ou refinado granulado varia em função do comprador, mas a maioria das especificações, tanto para o mercado interno como para o externo, cita um valor máximo de 0,04% para o cristal ou refinado granulado e 0,1% para o tipo VHP.

6.6 Cor Icumsa

A cor do açúcar é medida segundo metodologia aprovada pela Icumsa, em que um feixe de luz monocromática de comprimento de onda de 420 nm deve atravessar uma solução com concentração de 50 Brix, que foi previamente filtrada para eliminar qualquer resquício de turbidez.

A cor Icumsa é calculada como sendo mil vezes a absortividade da solução (absorbância específica), expressa em Unidades Icumsa (UI). A cor Icumsa do açúcar varia desde 1.200 UI, para um VHP, até um máximo de 20 UI, para um refinado granulado tipo K. O açúcar cristal é classificado por tipo, apresentando os seguintes valores de cor Icumsa máxima:

Tabela 6.7 Classificação do açúcar cristal por tipo em função da sua cor Icumsa.

Tipo 1	100 UI
Tipo 2	150 UI
Tipo 3	200 UI
Tipo 4	450 UI

6.7 Cinzas condutimétricas

O teor de cinzas no açúcar seria, por definição, o resíduo resultante da carbonização do produto. As cinzas seriam então os componentes minerais presentes no açúcar, em geral potássio, sódio, ferro, cálcio, magnésio, etc. Atualmente, esse indicador de qualidade é analisado de maneira indireta, medindo a condutividade elétrica de uma solução de açúcar; por meio de uma expressão, esse vapor é convertido em cinzas.

Devido ao fato de a existência de materiais minerais no açúcar conferir sabor, odor e cor ao produto, sua presença é indesejada, e as especificações existentes são bastante rigorosas quanto ao teor de cinzas. Os compradores de açúcar especificam o produto fixando um teor de cinzas de, no máximo, 0,04%

para os produtos de melhor qualidade (tipo 1), 0,05% para os de qualidade intermediária (tipo 2 e 3) e 0,07 e 0,10% para os de baixa qualidade (tipo 4 e tipo 5, respectivamente). Nos açúcares refinados do tipo granulado, o teor de cinzas deve ser inferior a 0,02%.

6.8 Açúcares redutores

A presença de açúcares redutores (AR), glicose e frutose, é um importante indicador de qualidade, pois revela a presença de mel no açúcar, o que prejudica outros indicadores de qualidade. Os AR também têm como característica serem altamente higroscópicos, ou seja, absorvem umidade da atmosfera envolvente, tornando o produto impróprio para ser armazenado por um período longo.

6.9 Resíduo insolúvel

Considera-se como resíduo insolúvel presente na amostra de açúcar todo o material retido por uma membrana de 8 µm de poros. Sua análise é realizada pela dissolução da amostra de açúcar em água filtrada. O material retido é pesado e expresso como sendo mg/kg de açúcar. Em nosso país, alguns compradores de açúcar adotam uma determinação simplificada do resíduo insolúvel, em que, após a filtração da solução, o material retido na membrana tem seu aspecto visual comparado com um padrão, recebendo um número de avaliação que vai de 1, para os de melhor qualidade, a 10, para os de pior qualidade.

O resíduo insolúvel é formado por materiais como partículas de bagaço (bagacinho), areia, fragmentos de material proveniente de incrustações, gomas, fragmentos metálicos, açúcar caramelizado, etc. As especificações dos compradores limitam a presença desse material até 10 mg/kg para os produtos de melhor qualidade, e de 20 mg/kg para os de qualidade inferior.

A presença de resíduo insolúvel no açúcar pode prejudicar a qualidade do produto em que ele for adicionado. Esse material pode ser percebido visualmente ou pelo sabor quando presente em balas, doces, sorvetes, licores, refrigerantes, etc., criando o aspecto de um produto acabado de má qualidade ou até mesmo deteriorado.

6.10 Partículas magnetizáveis

Esse material é originário de processos de desgaste dos componentes metálicos ferrosos dos equipamentos, apresentando um tamanho inferior a 1 mm.

A maioria das usinas dispõe, após o secador, de um eletroímã destinado a separar esse tipo de material. No entanto, algumas dessas partículas podem escapar do sistema de separação magnética instalado nas usinas, prejudicando a qualidade do produto.

Esse método é realizado a partir do escoamento de uma amostra de açúcar por uma superfície inclinada que dispõe de um forte magneto. Os materiais magnetizáveis retidos são pesados. O limite de detecção desse método é de 0,5 mg/kg. As especificações de açúcar cristal fixam um máximo aceitável de partículas magnetizáveis de 2 mg/kg para os produtos de boa qualidade. Para o açúcar refinado esse limite é de 1 mg/kg.

6.11 Dióxido de enxofre

O dióxido de enxofre (SO_2) é um agente alvejante e bloqueador de reações de escurecimento, utilizado em vários países consumidores de açúcar branco direto, como os nossos vizinhos da América do Sul, o Egito, o Paquistão, a Índia, etc. Existem diversas alternativas para o uso do SO_2 , como o processo de carbonatação utilizado pelos produtores de açúcar de beterraba. No entanto, essas alternativas são mais caras que a sulfitação.

O *Codex Alimentarius* estabelece um limite de $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de SO_2 em açúcar branco para consumo direto, o mesmo valor fixado pelos compradores brasileiros. Existe uma tendência internacional para fixar o teor máximo em $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. A presença de elevados teores de SO_2 no açúcar era responsável pela oxidação interna das embalagens metálicas e pela formação de gases que podem até provocar uma deformação na embalagem, em especial as metálicas.

6.12 Amido

O amido está presente na cana-de-açúcar, concentrando-se nos internódios, folhas e pontas da cana. O amido é extraído pelas moendas ou difusor, sendo parcialmente removido no tratamento do caldo. Na formação dos cristais de sacarose, o amido tende a se cocrystalizar com a sacarose, ficando depositado no interior dos cristais.

A crescente adoção pelas usinas da colheita de cana mecanizada, em que não se realiza a queima da cana (cana crua), tem resultado na maior incidência de impurezas vegetais, como palha e ponta, no material entregue às usinas. Essas impurezas apresentam um alto teor de amido, que acaba aparecendo no

caldo extraído. Os teores de amido nas diversas variedades de cana no Brasil oscilam entre 150 e 600 mg/kg, podendo aparecer no produto acabado nos mais variados níveis, dependendo do processo de tratamento do caldo praticado.

Os compradores de açúcar cristal estipulam um máximo de amido de 180 mg/kg. Os compradores externos de açúcar VHP já são mais rigorosos, fixando em geral um máximo de 140 mg/kg. Segundo Oliveira, Esquiaveto & Silva Jr. (2007), existe um desconhecimento sobre os impactos que os componentes do amido (amilase e amilopectina) têm sobre esse segmento da indústria. O maior impacto na indústria alimentícia está associado à maior dificuldade de filtração das soluções de açúcar, similar ao efeito citado no item anterior para resíduos insolúveis.

6.13 Dextrana

A dextrana é um polissacarídeo constituído por moléculas de glicose ligadas linearmente, e com peso molecular que pode chegar a vários milhões de Daltons. A dextrana não é natural da cana, mas um produto da ação de micro-organismos como o *leuconostoc mesenteroides*. O micro-organismo causador da dextrana aparece principalmente nos meses mais quentes do ano e em épocas de chuva. Canas que entram em contato com o solo ou que levam um tempo muito grande entre a sua queima e a sua colheita são as mais suscetíveis.

Tal como o amido, a dextrana gerada na usina, nas moendas ou peneiras por falta de assepsia, tende a se alojar no interior dos cristais de sacarose. Como um dos principais efeitos na indústria, a dextrana contribui para aumentar a viscosidade das soluções açucaradas, e, pela alteração da viscosidade, impede o endurecimento de balas, dificultando a sua embalagem, aumenta o efeito “puxa-puxa” em barras de cereais, tem forte impacto na filtração de caldas de açúcar, entre outros efeitos.

As normas dos compradores internacionais de açúcar VHP fixam um máximo admissível de dextrana de 170 mg/kg. Para açúcar cristal, as normas citam 100 mg/kg como máximo. A presença de dextrana no açúcar afeta negativamente outros itens de qualidade, especialmente a filtrabilidade e a tendência de formação de flocos em bebidas, pois o açúcar com altos níveis de dextrana, assim como de amido, tende a flocular em bebidas do tipo refrigerante.

6.14 Granulometria

A granulometria do açúcar é definida pelo tamanho médio dos cristais (AM) e pela uniformidade dos tamanhos ou coeficiente de variação (CV). Essa determinação é realizada pela utilização de uma série de peneiras, em que os grânulos de açúcar se distribuem segundo o seu tamanho.

Em geral, o açúcar de granulometria desuniforme, de alto CV, apresenta outros indicadores de qualidade ruins, pois a presença de cristais pequenos (alta superfície específica) ou muito grandes (em geral aglomerados) prejudica tanto a cor como o teor de cinzas e a umidade.

O tamanho dos cristais, ou AM, deve se situar entre 0,4 e 0,6 mm, sendo o CV considerado muito bom quando inferior a 30%, bom entre 30 e 35%, ruim entre 35 e 40% e péssimo acima de 40%. Além dos prejuízos com relação aos outros indicadores de qualidade, cristais desuniformes, em geral, apresentam uma alta densidade aparente e uma tendência a compactar. Devido ao elevado número de pontos de contato entre os cristais, o açúcar de granulometria desuniforme tende a empedrar na armazenagem.

6.15 Presença de metais

O teor de cinzas no açúcar indica o total de material mineral no produto. No entanto, alguns metais, por serem tóxicos, são controlados individualmente, especialmente pelos órgãos oficiais de saúde pública e pelos compradores. Os metais mais controlados são o arsênio, o cobre, o chumbo, o ferro e o mercúrio. Em alguns casos, são controlados também os elementos cádmio, zinco, cromo e manganês.

Arsênio: as normas especificam menos de 1 mg/kg de açúcar.

Cobre: as normas especificam menos de 2 mg/kg para açúcar cristal. Os fabricantes de refrigerantes estipulam menos de 1 mg/kg.

Chumbo: as normas especificam menos de 0,5 mg/kg para açúcar cristal e menos de 0,1 mg/kg pelos engarrafadores de refrigerantes.

Mercúrio: as normas especificam menos de 0,01 mg/kg para qualquer tipo.

Ferro: Apesar de ser um metal não tóxico e mesmo com características nutricionais, por conferir cor e sabor ao açúcar as especificações estipulam um máximo de 2 mg/kg.

6.16 Metodologia analítica

As metodologias analíticas utilizadas pelo setor açucareiro são as propostas pelo organismo internacional Icumsa, criado em 1896 em Londres, e que se reúne a cada quatro anos para discutir a questão de metodologias analíticas açucareiras.

As metodologias propostas pela Icumsa são adotadas em nível mundial no comércio internacional de açúcar. Entidades das Nações Unidas como a

Food and Agriculture Organization (FAO) e a *World Health Organization (WHO)* utilizam os métodos da Icumsa em suas normas.

Além das metodologias da Icumsa, existem metodologias específicas dos próprios compradores de açúcar para atender uma necessidade de qualidade vinculada a seu produto. Existem, assim, os fabricantes de refrigerantes que solicitam testes de floculação, ou seja, da possibilidade de o açúcar formar flocos na bebida. As refinarias de açúcar dão muito valor a um teste de filtrabilidade, que mede a capacidade de a solução de açúcar permear por uma superfície filtrante.

Em nosso país, os compradores de açúcar, especialmente aquele destinado ao consumo humano direto, criaram um teste de pontos pretos que determina a presença de partículas de cor contrastante as quais enfeiam o produto e indicam a presença de impurezas e sujidades.

UNIDADE 7

Balanço energético I

7.1 Introdução

O controle químico de uma usina ou destilaria de álcool tem como objetivo a produção de açúcar e álcool com elevado rendimento e geração de produtos de qualidade. Outro objetivo refere-se aos aspectos energéticos da empresa. O controle químico contribui para que o processo tecnológico seja eficiente também nos aspectos energéticos.

As indústrias sucroalcooleiras brasileiras devem operar sob o princípio da autossuficiência energética, significando que todas as suas necessidades nessa área sejam supridas pela combustão do bagaço da cana. Atualmente, considera-se que a usina deve, inclusive, gerar excedentes energéticos para serem transformados em energia elétrica que pode ser vendida para a concessionária pública de eletricidade. A geração simultânea de diversas formas de energia é denominada de cogeração.

Uma indústria sucroalcooleira necessita de uma grande quantidade de energia para realizar a extração da sacarose da cana, o tratamento do caldo e a sua cristalização. Na produção de álcool existe um grande consumo de energia na operação de destilação. As principais formas de energia utilizadas são:

- Mecânica e elétrica: para acionamento das moendas, facas, desfibradores, geradores, bombas, esteiras, pontes rolantes, etc.
- Térmica: nos aquecedores de caldo, evaporadores, cozedores, secadores, destilaria, etc.

7.2 Demanda energética na produção de álcool

O processo agroindustrial de produção de álcool apresenta, inicialmente, uma demanda de energia na produção de cana, nas operações agrícolas, no transporte dos colmos de cana do campo para a indústria, na energia embutida nos fertilizantes, no calcário e nos herbicidas (Tabela 7.1). O total da demanda média de energia nessa fase é de 45.426 kcal por t de cana processada.

Tabela 7.1 Demandas de energia para a produção de cana-de-açúcar.

Item	Valor médio kcal/t de cana	Melhor valor kcal/t de cana
Operações agrícolas	7.201	7.201
Transporte	8.355	7.624
Fertilizantes	16.020	13.420
Calcário	1.681	1.681
Herbicida	2.690	2.690
Inseticida	190	190
Mudas	1.378	1.278
Equipamentos	7.911	7.911
Total	45.426	41.995

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Piracicaba.

Na etapa industrial do processo, a demanda média de energia totaliza 8.707 kcal por t de cana processada, conforme a Tabela 7.2.

Tabela 7.2 Demandas de energia para a industrialização da cana-de-açúcar.

Item	Valor médio kcal/t de cana	Melhor valor kcal/t de cana
Energia elétrica	0	0
Produtos químicos e lubrificantes	1.757	1.757
Edificações	1.930	1.930
Equipamentos pesados	2.350	2.350
Equipamentos leves	2.670	2.670
Total	8.707	8.707

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Piracicaba.

Tabela 7.3 Demandas de energia para o sistema agroindustrial global.

Item	Valor médio – kcal/t		Melhor valor
	Insumos energéticos	Produção	Insumos energéticos
Setor agrícola	45.426		41.995
Setor industrial	11.027		8.707
Álcool		477.600	
Bagaço		41.900	
Total	56.453	519.500	50.702
Produção/insumo		9,2	11,2

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Piracicaba.

Pelo balanço energético global apresentado na Tabela 7.3, pode-se ver, pelos valores, que a cana demanda 45.426 kcal/t na sua fase agrícola e 8.707 kcal/t na fase industrial, totalizando 56.453 kcal/t no sistema agroindustrial. Por outro lado, a energia contida no bagaço da cana e no álcool produzido totaliza 519.500 kcal/t, ou seja, para cada caloria consumida pelo sistema, tem-se uma geração de 9,2 calorias, e o melhor valor é de 11,2 kcal geradas por kcal consumida.

7.3 Circuito térmico de uma usina

Numa usina ou destilaria típica, o bagaço gerado nas moendas é transportado por esteiras até as caldeiras onde, por combustão, a energia térmica é liberada, gerando vapor. A pressão do vapor é de 20 kg/cm² na maioria das usinas, mas as unidades mais modernas já estão adotando pressões maiores, como 40 ou 60 kg/cm². O vapor das caldeiras é então enviado para turbinas que geram a potência mecânica necessária para acionar as facas, as moendas e o gerador elétrico.

As turbinas trabalham com contrapressão, gerando o denominado vapor de escape com pressão ao redor de 1,5 kg/cm², que é utilizado nos equipamentos que necessitam de aquecimento, como os trocadores de calor, evaporação, destilaria, etc. Nesses equipamentos, o vapor cede o seu calor sensível condensado, e esse condensado é recolhido e enviado para a caixa-d'água das caldeiras a fim de ser reutilizado (Figura 7.1).

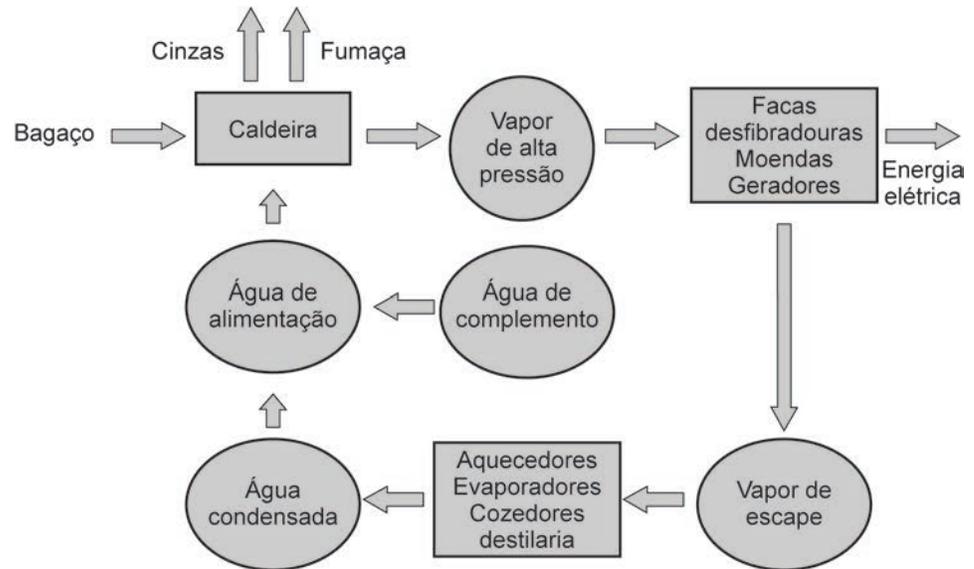


Figura 7.1 Circuito térmico de uma usina.

7.4 Produção de bagaço de cana

A produção de bagaço por t de cana, como já foi visto, é uma função do teor de fibra no bagaço e da fibra na cana, conforme a expressão:

$$\text{Bagaço (kg/t de cana)} = 1.000 \cdot \frac{F_C}{F_B}$$

em que:

F_B : teor de fibra no bagaço;

F_C : teor de fibra na cana.

A quantidade de bagaço de cana gerado no setor de extração (seja por moenda ou por difusor), considerando que ele apresente uma umidade de 50% e um Brix de 3%, que resulta num teor de fibra de 47%, é apresentada na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 Produção de bagaço em função do teor de fibra na cana.

Fibra na cana (%)	Bagaço (kg/t cana)
11,0	234
11,5	245
12,0	255
12,5	266
13,0	277
13,5	287
14,0	298

Pode ser visto na tabela que uma cana padrão para o estado de São Paulo, com teor de fibra ao redor de 12,5%, resulta numa produção de bagaço de 266 kg/t de cana processada.

7.5 Composição do bagaço de cana

O bagaço é composto de 50% de água, 2 a 3% por material solúvel, em que a maior parte é a sacarose, sendo o restante (46 a 48%) material fibroso. A parte fibrosa, por sua vez, é composta de quase 50% (46 a 48%) de celulose, conforme pode ser visto na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 Composição do bagaço de cana.

Umidade	50% bagaço
Sólidos solúveis (Brix)	2 a 3% bagaço
Fibra	46 a 48% bagaço
Celulose	48% fibra
Hemicelulose	25% fibra
Lignina	12% fibra

7.6 Poder calorífico do bagaço de cana

O bagaço é o combustível que aciona a usina e a destilaria. Assim, sua principal característica é o seu poder calorífico. Dados experimentais realizados em fibras de bagaço de canas do Estado de São Paulo forneceram o seguinte valor médio:

$$\text{Poder calorífico superior (PCS)} = 4.600 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

O poder calorífico inferior, que é o valor mais utilizado em cálculos de geradores de vapor, pode ser estimado a partir do conhecimento do PCS e do teor de hidrogênio no combustível. Como o teor médio de hidrogênio na fibra é de 6,5%, tem-se:

$$\text{Poder calorífico inferior (PCI)} = 4.600 - 6 \cdot 9 \cdot 6,5 = 4.250 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Os valores apresentados referem-se ao poder calorífico da fibra do bagaço. No entanto, o bagaço, como foi visto, apresenta-se com uma umidade que gira ao redor de 50%. O poder calorífico do bagaço úmido, segundo E. Hugot (1969), levando em conta o poder calorífico da fibra, do açúcar residual e descontando o fator umidade, é apresentado pela expressão:

$$\text{PCS} = 4.600 - 12s - 46,0w$$

$$\text{PCI} = 4.250 - 12s - 48,5w$$

em que:

PCS e PCI: poder calorífico superior e inferior, respectivamente, em kcal/kg;

s: teor de sacarose do bagaço (pol);

w: teor de umidade em %.

O poder calorífico do bagaço com diferentes umidades, o teor de sacarose e o teor de cinzas podem também ser estimados pela expressão devida a *Southern African Sugar Technologists Association* (2008), apresentada a seguir:

$$\text{PCI} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 18.309 - 207,6U - 196,05C - 31,14B$$

em que:

U: umidade em %;

C: cinzas em %;

B: Brix.

Na Tabela 7.6, é apresentado o poder PCI de bagaços, em que se pode ver o comportamento desse parâmetro para diferentes valores de umidade e polarização.

Tabela 7.6 Poder calorífico do bagaço com diferentes umidades e diferentes teores de sacarose.

Umidade (%)	Pol (°Z)	PCI (kcal/kg)
49	1	1.861
49	2	1.850
49	3	1.837
50	1	1.813
50	2	1.801
50	3	1.789
51	1	1.764
51	2	1.752
51	3	1.740

7.7 Queima do bagaço e caldeira

A queima de um combustível consiste na reação exotérmica com um comburente oxidante (oxigênio do ar). São produtos da combustão os óxidos CO, CO₂, H₂O e SO₂, que passam a compor o efluente gasoso (fumaça). O material mineral que compõe o bagaço passa a constituir o resíduo sólido da combustão, denominado cinza. O equipamento no qual a queima do combustível ocorre para a produção de vapor é denominado de gerador de vapor ou caldeira.

Assim, sob o aspecto de balanço material, a caldeira é o equipamento onde entra combustível e sai fumaça e cinzas (Figura 7.2). A energia gerada nessa operação é utilizada para aquecer e vaporizar o fluido de trabalho, que é a água. O vapor-d'água gerado sofre ainda um superaquecimento antes de ser enviado para os equipamentos.

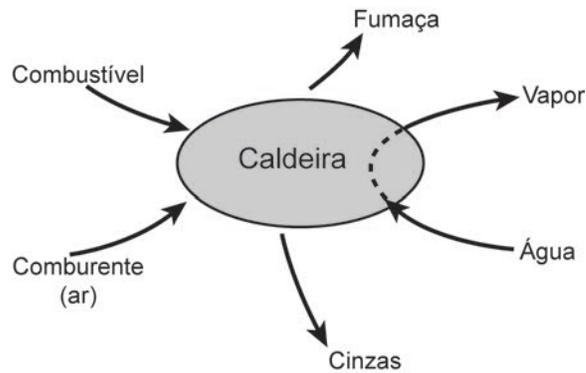


Figura 7.2 Fluxos mássicos numa caldeira.

Um dos principais itens de controle de um gerador de vapor é o seu rendimento ou eficiência termodinâmica. Uma operação deficiente desse equipamento pode comprometer toda uma política de economia de combustível de uma empresa. No entanto, não existe em nosso país um procedimento padronizado para o cálculo do rendimento da caldeira, e os métodos existentes e adotados podem levar a resultados não comparáveis entre si.

No exterior, existem várias normas, das quais pode-se citar a norma da *The American Society of Mechanical Engineering* (ASME). Ela é aplicada quando da recepção de equipamentos ou para verificar o seu desempenho, capacidade, etc.

A característica da norma ASME é considerar que a energia útil, absorvida pelo fluido de trabalho, inclui a energia consumida pela própria caldeira como aquela associada ao soprador de fuligem e à purga da caldeira, sendo esses vapores somados à energia do vapor produzido. A energia elétrica consumida nas bombas de circulação, nos ventiladores, etc. é considerada como uma entrada de energia.

7.8 Balanço de energia de uma caldeira

O balanço de energia de uma caldeira operando em regime estacionário pode ser escrito da seguinte maneira:

$$Q_f = Q_u + P$$

em que:

Q_f : energia fornecida à caldeira por unidade de tempo;

Q_u : energia útil absorvida pelo fluido de trabalho por unidade de tempo;

P : perdas por unidade de tempo.

A eficiência de uma caldeira calculada pelo método direto é considerada como sendo a relação entre a energia útil absorvida e a energia fornecida:

$$\varepsilon = \frac{Q_u}{Q_f}$$

Pode-se igualmente calcular a eficiência por um método indireto, também conhecido como método das perdas:

$$\varepsilon = 1 - \frac{P}{Q_f}$$

Essas equações são genéricas e para aplicá-las deve-se estipular a fronteira do sistema a ser controlado, também conhecido como volume de controle. Assim, as demandas de energia requeridas pela caldeira, como a bomba-d'água, os sopradores de fuligem, etc., serão consideradas ou não no balanço de energia, dependendo de como se situa a superfície de controle.

A expressão para o cálculo da eficiência pelo método direto é apresentada a seguir:

$$\varepsilon_d = \frac{mv \cdot (hv - ha)}{mc \cdot qf}$$

em que:

mv: vazão do vapor não incluindo o gasto na sopragem da fuligem (kg/h);

hv: entalpia do vapor (kJ/kg);

ha: entalpia da água de alimentação (kJ/kg);

mc: vazão de combustível úmido (kg/h);

qf: energia fornecida por unidade de massa de combustível (kJ/kg).

7.9 Cálculo da eficiência pelo método indireto ou das perdas

A eficiência de uma caldeira calculada pelo método indireto é bastante útil quando se tem dificuldades em determinar com precisão a vazão de combustível ou do vapor gerado. Esse método baseia-se na determinação das perdas de energia por meio da superfície de controle. Os locais de perda de energia são os gases expelidos pela chaminé, a purga, as cinzas, por irradiação, etc.

As perdas pela chaminé ocorrem pelos seguintes motivos:

- perda de energia associada à entalpia dos gases secos exalados;
- perda associada à entalpia do vapor d'água gerado pela combustão ou pela umidade do combustível;
- perda associada à entalpia do vapor utilizado no assopramento da fuligem;
- perda associada à entalpia do monóxido de carbono presente nos gases expelidos pela chaminé;
- perda associada à entalpia dos particulados expelidos pela chaminé.

As denominadas purgas da caldeira correspondem às retiradas de líquido da caldeira, indispensáveis para manter a concentração de sólidos dissolvidos na água dentro dos limites de controle e para evitar problemas como corrosão ou arraste de água para o vapor. A purga corresponde em média a 3% da massa de vapor gerado. A retirada da purga pode ser contínua ou intermitente. Neste segundo caso, utiliza-se para fins de cálculo um valor médio.

As cinzas geradas na combustão também possuem entalpia associada, especialmente por apresentarem resíduos de combustível, como o carbono não queimado.

As perdas por radiação e convecção são de medida bastante complexa, podendo-se recorrer a ábacos apresentados no código ASME. Para se realizar essa determinação, são necessárias várias informações operacionais.

O cálculo da eficiência pelo método indireto é então realizado pela expressão:

$$\epsilon_i = 1 - \left[\left(\frac{P_g + P_a + P_n + P_{co} + P_{pt} + P_p + P_m + P_{tc}}{Q_f} \right) + \frac{P_r}{100} \right]$$

em que:

P_g : entalpia associada aos gases secos na chaminé;

P_a : entalpia associada ao vapor-d'água proveniente da umidade do combustível, da combustão do hidrogênio presente no combustível e da umidade do ar;

P_n : entalpia associada ao vapor utilizado na sopragem de fuligem;

P_{co} : entalpia associada à presença de monóxido de carbono nos gases da chaminé;

Ppt: entalpia associada aos particulados presentes nos gases da chaminé;

Pp: perdas por purgas;

Pm: entalpia associada à presença de combustível no material retirado;

Ptc: entalpia associada às cinzas;

Pr: entalpia associada às perdas por radiação e convecção;

Qf: energia fornecida.

As perdas de calor pela chaminé podem ser calculadas pela expressão:

$$q = [(1 - w)(1,4\gamma - 0,13) + 0,5] \cdot t$$

em que:

q: calor perdido pela chaminé em kcal/kg de bagaço queimado;

t: temperatura de expulsão dos gases em °C;

w: umidade do bagaço em fração decimal;

γ : excesso de ar em relação ao peso necessário;

A quantidade de vapor possível de ser obtida pela queima do combustível pode ser calculada em função do poder calorífico do combustível e das perdas, conforme a expressão:

$$Mv = (PCI - q)\alpha\beta\eta$$

em que:

Mv: calor transmitido ao vapor em kcal/kg de bagaço;

PCI: poder calorífico inferior do bagaço em kcal/kg;

q: calor sensível perdido pela chaminé em kcal/kg de bagaço;

α : coeficiente dos sólidos não queimados (cerca de 0,98);

β : coeficiente que leva em conta as perdas por radiação em convecção (varia de 0,95 a 0,99);

η : coeficiente que leva em conta a combustão deficiente provocada por combustível úmido, excesso de ar, baixa temperatura da fornalha, etc. (varia de 0,80 a 0,99).

A quantidade de vapor gerado por kg de bagaço queimado varia em função da eficiência da caldeira. Considerando um combustível com 50% de umidade,

é calculada pela expressão:

$$\text{Produção de vapor/kg bagaço} = \frac{Mv}{L}$$

em que:

Mv: já definido anteriormente;

L: calor necessário para produzir 1 kg de vapor, considerando o vapor superaquecido e que a água de alimentação está a 90 °C (ao redor de 660 kcal por kg).

Realizando os cálculos, tem-se:

- Caldeira de baixa eficiência (< 60%): 1,7 kg de vapor/kg de bagaço.
- Caldeira de média eficiência (60 a 65%): 1,8 kg de vapor/kg de bagaço.
- Caldeira de boa eficiência (65 a 70%): 2,0 kg de vapor/kg de bagaço.
- Caldeira de alta eficiência (70 a 80%): 2,2 kg ou mais de vapor/kg de bagaço.

7.10 Geração de energia mecânica

A energia mecânica necessária para movimentar as facas, moendas e geradores em uma indústria sucroalcooleira pode ser gerada pelos seguintes processos:

- Máquinas a vapor alternativas (locomóvel): processo já abandonado pela baixa eficiência e baixa potência gerada.
- Turbinas a vapor: processo em uso atualmente e que existe em diversas versões, como simples estágio, múltiplo estágio, turbinas de contrapressão, turbinas de condensação, etc.
- Motores elétricos: sistema que está se impondo cada vez mais e está mostrando-se ideal para unidades que praticam a cogeração.

As turbinas a vapor são máquinas térmicas de combustão externa (o combustível queima na caldeira, cedendo calor por meio do vapor) não alternativas, isto é, não possuem válvulas que abrem ou fecham alterando as condições ao longo do ciclo, como a máquina a vapor ou os motores Otto e Diesel.

O princípio de funcionamento é baseado na conversão de energia calorífica em energia cinética. Ao passar por um rotor dotado de paletas engastadas neste, o vapor de alta pressão se expande e perde pressão e temperatura, cedendo parte de sua energia ao rotor da turbina, realizando, assim, a conversão termomecânica por meio do trabalho realizado pelo gás (vapor-d'água) durante sua expansão. Na Figura 7.3, pode-se ver os componentes de uma turbina, que são:

- Estator (roda fixa): elemento fixo da turbina (que envolve o rotor) cuja função é transformar a energia potencial (térmica) do vapor em energia cinética por meio dos distribuidores;
- Rotor (roda móvel): elemento móvel da turbina (envolvido pelo estator) cuja função é transformar a energia cinética do vapor em trabalho mecânico por meio dos receptores fixos;
- Expansor: órgão cuja função é orientar o jato de vapor sobre as palhetas móveis. No expansor, o vapor perde pressão e ganha velocidade. Podem ser convergentes ou convergentes-divergentes, caso sua pressão de descarga seja maior ou menor que 55% da pressão de admissão.



a)



b)

Figura 7.3 Foto de uma turbina mostrando os seus componentes internos: a) Turbina a vapor de múltiplos estágios, sem a tampa superior; b) Rodas de uma turbina.

7.11 Consumo específico de uma turbina

O consumo específico teórico de vapor de uma turbina é definido como sendo a massa de vapor necessária para se produzir uma unidade de potência.

Por exemplo: kg de vapor/hora por HP. Esse consumo é inversamente proporcional à eficiência da máquina e refere-se a uma expansão adiabática e isentrópica do vapor, ou seja, à eficiência máxima.

Como 641,6 kcal equivalem a 1 HPh, pode-se escrever:

$$\text{CET} = \frac{641,6}{H_1 - H_2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{HP} \cdot \text{h}}$$

em que H_1 e H_2 são as entalpias disponíveis na entrada e na saída.

O consumo específico real, ou eficiência real, considera que o processo real é irreversível, ocorrendo um aumento da entropia com perdas na válvula de admissão, nos bocais, nas pás, por atrito, etc. Dessa forma, pode-se definir a eficiência real (ϵ) como sendo a relação:

$$\epsilon = \frac{\text{Salto entálpico real}}{\text{Salto entálpico teórico}} = \frac{H_1 - H_3}{H_1 - H_2}$$

em que:

$$H_1 - H_3 = \text{Salto térmico real};$$

$$H_1 - H_2 = \text{Energia disponível.}$$

O consumo específico de uma turbina pode ser calculado pela expressão:

$$Q = \frac{632}{(L - L') \cdot n \cdot r_1}$$

em que:

Q: consumo de vapor em kg/HP por hora;

L: calor total na câmara de admissão em kcal/kg;

L': calor total na câmara de escape em kcal/kg;

n: rendimento termodinâmico da turbina em fração decimal;

r_1 : rendimento do redutor em fração decimal (pode variar de 0,97 a 0,99).

Exemplo 1: Calcular o consumo de uma turbina que opera com vapor a 21 bar (300 °C, $L = 730$ kcal/kg) e escape a 1,5 bar ($L' = 612$ kcal/kg). O rendimento da turbina é de 45%, e do redutor 90%.

$$Q = \frac{632}{(L - L') \cdot n \cdot r_1} = \frac{632}{(730 - 614) \cdot 0,45 \cdot 0,90} = 13,5 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{HP}}$$

Esse valor corresponde a 18,1 kg de vapor por kwh.

Exemplo 2: Uma turbina de contrapressão opera com um vapor de 60 bar (450 °C) com escape de 1,5 bar (128 °C). O equipamento consome 14.400 kg/h de vapor, gerando 1.200 HP. Calcular a sua eficiência.

Pelo diagrama de Mollier, tem-se as entalpias:

- Vapor a 60 bar, 450 °C = 788 kcal/kg;
- Vapor a 1,5 bar, 128 °C = 650 kcal/kg.

Consumo específico = 14.400/1.200 = 12 kg/HPh.

$$\varepsilon(\%) = \frac{632}{Q(L - L')} = \frac{632}{12(788 - 650)} = 38\%$$

A eficiência das turbinas em função do seu tipo pode ser vista na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 Eficiência das turbinas.

Máquina	Eficiência
Turbina de simples estágio	35 a 45%
Turbina de múltiplos estágios	60 a 70%
Turbina de múltiplos estágios no acionamento de geradores	83 a 87%
Redutores	98,00%

UNIDADE 8

Balanço energético II

8.1 Introdução

O vapor gerado pelas caldeiras é utilizado para a geração da energia mecânica que aciona as facas, desfibradores, moenda, turbogeradores e turbobombas. Esses equipamentos são acionados por turbinas a vapor que operam em sua maioria com contrapressão, gerando um denominado vapor de escape com pressão de 1,5 kg/cm². Esse vapor de baixa pressão é utilizado para gerar calor pela sua condensação.

A demanda de vapor pelas turbinas é uma função da potência requerida pelo equipamento que ela aciona. Essa energia é medida em HP ou kW, e a quantidade de vapor necessária é o assunto que será tratado a seguir.

8.2 Demanda de vapor direto no preparo da cana

A demanda de potência no preparo da cana varia em função do tipo de preparo adotado e do teor de fibra na cana. Os valores mais usuais são vistos na tabela a seguir:

Tabela 8.1 Demanda de potência no preparo da cana.

Nivelador	20 kwh/t de fibra/hora (± 3,5 HP/TCH)
Picador (total)	14 kwh/t de fibra/hora (± 2,4 HP/TCH)
1º Picador	18 kwh/t de fibra/hora (± 3,0 HP/TCH)
2º Picador	24 kwh/t de fibra/hora (± 4,0 HP/TCH)
Desfibrador leve (IP = 85%)	35 kwh/t de fibra/hora (± 6,0 HP/TCH)
Desfibrador pesado (IP = 90%)	55 kwh/t de fibra/hora (± 9,5 HP/TCH)
Desfibrador extra pesado (IP = 93%)	20 kwh/t de fibra/hora (± 3,5 HP/TCH)

A potência absorvida pode também ser calculada em função de alguns parâmetros da cana e do equipamento pela fórmula a seguir:

$$w = \frac{k \cdot i_p \cdot c \cdot N \cdot R \cdot F}{P}$$

em que:

w: potência absorvida em HP;

k: coeficiente de proporcionalidade;

$$\text{Facas} = 40 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Desfibradores} = 90 \cdot 10^{-4}$$

I_p : índice de preparo da cana em fração decimal;

$$1^{\text{o}} \text{ jogo de facas} = 0,60$$

$$2^{\text{o}} \text{ jogo de facas} = 0,90$$

c : processamento de cana em t/hora;

N : velocidade de rotação das facas ou desfibradores em rpm;

R : raio do equipamento em mm;

F : teor de fibra na cana em fração decimal;

P : passo da faca em mm.

Em função desses parâmetros, é possível construir a Tabela 8.2, na qual pode-se ver a dependência da potência em função do teor de fibra na cana, considerando que o preparo é realizado por um conjunto picador seguido de um desfibrador e que o índice de células abertas é de 85%.

Tabela 8.2 Demanda de potência no preparo em função do teor de fibra.

Fibra (%)	kwh/t de cana
12	5,3
13	5,7
14	6,2
15	6,6

Conhecendo-se a demanda de potência pelo equipamento, pode-se calcular a demanda de vapor no preparo da cana (T_1) em kg/h pela expressão:

$$T_1 = P_F \cdot E_T \cdot C$$

em que:

P_F : potência absorvida no preparo de cana em HP/t de cana;

E_T : consumo específico de vapor da(s) turbina(s) em kg/HP;

C : moagem da usina em t de cana por hora.

Como exemplo, considera-se uma usina que demanda no preparo de cana 6 HP/t por hora e cujas turbinas consomem 14 kg de vapor/HP:

$$T_1 = 14,0 \cdot 6,0 \cdot 1 = 84 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \text{ de cana hora}$$

8.3 Demanda de vapor na moagem

Para o cálculo da demanda de vapor na moagem, deve-se inicialmente calcular a demanda de potência mecânica para o acionamento do equipamento. A potência absorvida nesse setor é bastante influenciada pelo preparo de cana adotado. Quanto melhor o preparo, menor é a potência demandada na moagem. Além do preparo, fatores relacionados com a cana e a própria moenda são significativos, tais como:

- teor de fibra, cuja influência está relacionada diretamente com a potência;
- compressão do bagaço;
- potência absorvida pela fricção na bagaceira e pelo atrito nos pentes;
- tonelagem de cana processada.

Emile Hugot (1969) em seu livro *Engenharia Açucareira* apresenta a seguinte fórmula para o cálculo da potência requerida:

$$T = 0,20 \cdot p \cdot n \cdot D$$

em que:

T: potência absorvida por terno em HP;

p: pressão hidráulica em toneladas;

n: velocidade dos rolos em rpm;

D: diâmetro dos rolos em metros.

Observação: caso a moenda disponha de rolo de pressão, deve-se acrescentar 12% na potência calculada.

A demanda de potência nas moendas em função do teor de fibra na cana está apresentada na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 Potência consumida na moagem em função do teor de fibra na cana.

Fibra %	Potência HP/TCH	Fibra %	Potência HP/TCH
11,0	12,1	13,0	14,3
11,5	12,7	13,5	14,9
12,0	13,2	14,0	15,4
12,5	13,8	14,5	16,0

A demanda de vapor na moagem (T_2) é uma função da potência requerida na operação e do consumo específico de vapor na máquina de acionamento:

$$T_2 = P_M \cdot E_T \cdot C$$

em que:

P_M : potência absorvida na moagem em HP/t de cana;

E_T : consumo específico de vapor da(s) turbina(s) em kg/HP;

C : moagem da usina em t de cana por hora.

Considerando uma usina que demanda na moagem 16 HP/t de cana/hora e cujas turbinas consomem 14 kg de vapor/HP, tem-se, para uma moagem de 1 t/h:

$$T_2 = P_M \cdot E_T \cdot C = 16,0 \cdot 14,0 \cdot 1 = 224 \frac{\text{kg de vapor}}{\text{t cana}}$$

8.4 Consumo de energia elétrica numa usina convencional

Outro grande local de demanda de vapor direto nas usinas e destilarias é na autogeração de eletricidade nos denominados turbogeradores. O consumo dessa forma de energia sofre grande variação de uma unidade industrial para outra, mas a demanda média por setor pode ser vista a seguir, na Tabela 8.4:

Tabela 8.4 Demanda média de energia por setor da usina.

Moendas	4,0 kVA/TCH
Caldeiras	1,5 kVA/TCH
Tratamento do caldo	1,0 kVA/TCH
Circuito de águas de resfriamento	1,5 kVA/TCH
Circuito de águas de lavagem de cana	0,5 kVA/TCH
Circuito de águas das colunas barométricas	1,5 kVA/TCH
Eventuais	1,0 kVA/TCH
Destilaria anexa	1,5 kVA/TCH
Torre de resfriamento	3,0 kVA/TCH
Destilaria autônoma	0,42 kVA/TCH ou 0,60 kVA/100 litros de álcool

Uma usina de açúcar convencional consome energia de uma forma global, em um total de 25 kWh por t de cana processada. Desse valor, 11 kWh correspondem à energia elétrica, e 14 kWh à energia mecânica. Uma destilaria autônoma de álcool tem um consumo menor por t de cana processada, ao redor de 7 kWh. Conhecendo-se a demanda, pode-se calcular as necessidades de vapor direto pelo setor de geração (T_3) por meio da seguinte expressão:

$$T_3 = \frac{1,34 \cdot D_E \cdot E_T \cdot C}{\eta}$$

em que:

D_E : demanda específica de energia elétrica em kw/t de cana por hora;

E_T : consumo específico de vapor da(s) turbina(s) em kg/HP;

η : eficiência do gerador e do redutor em decimal;

C: moagem da usina em t de cana por hora.

Como exemplo, calcula-se o consumo de vapor direto pelos turbogeradores numa usina que demanda 13 kw de potência por t de cana. Os geradores, que possuem uma eficiência de 90%, são acionados por turbina cujo consumo específico é de 9 kg de vapor/t de cana:

$$T_3 = \frac{1,34 \cdot D_E \cdot E_T \cdot C}{\eta} = \frac{1,34 \cdot 13 \cdot 9 \cdot 1}{0,90} = 174 \frac{\text{kg vapor}}{\text{t cana}}$$

8.5 Demanda de vapor de escape

O vapor, após seu uso para geração de potência motora nas turbinas acionadoras das facas, moendas e geradores, resulta no vapor de escape que, apesar da baixa pressão (1,5 kg/cm²), possui calor latente de condensação e seu destino são equipamentos que necessitam de aquecimento, tais como:

- trocadores de calor aquecedores de caldo, que elevam a sua temperatura até pouco mais que 100 °C;
- evaporadores, que concentram o caldo de seu Brix original até um valor superior a 60 °Brix;
- cozedores, que realizam a cristalização da sacarose;
- secador, que reduz a umidade do açúcar até o valor especificado;
- destilaria, que procede a separação do álcool do vinho e sua retificação e desidratação;
- outros consumos, como na lavagem do açúcar na centrífuga, aquecimento d'água para as caldeiras, etc.

A demanda de vapor de escape nos aquecedores de caldo pode ser calculada pela expressão:

$$M = \frac{p \cdot c \cdot (t_1 - t_0)}{L} \cdot r$$

em que:

M: vapor consumido em kg/h;

p: vazão do caldo em kg/h;

c: calor específico do caldo em kcal/kg °C;

t₁ e t₀: respectivamente a temperatura do caldo quente e frio em °C;

L: calor latente de condensação do vapor de aquecimento em kcal/kg. Vapor de escape a 111 °C = 535 kcal/kg. Vapor vegetal do primeiro corpo evaporador a 102 °C = 538 kcal/kg;

r: valor que leva em conta as perdas de calor no equipamento, que em geral é de 5%.

Como exemplo, calcula-se a demanda de vapor de escape para o caldo ser aquecido de 30 para 105 °C, considerando que cada t de cana processada

resulta em 1.000 kg de caldo misto, com 0,90 kcal/kg°C de calor específico. O vapor de escape tem ao redor de 535 kcal/kg de calor latente de condensação:

$$M = \frac{p \cdot c \cdot (t_1 - t_0)}{L} \cdot r = \frac{1.000 \cdot 0,9 \cdot (105 - 30)}{535} \cdot 1,05 = 133 \frac{\text{kg}}{\text{hora}}$$

Outra operação que demanda vapor de escape é a evaporação, e a quantidade de vapor requerida foi estimada ao ser realizado o balanço de massa da operação, que resultou na expressão matemática:

$$V = \frac{[C(1 - B_c/B_x) + S(n - 1)]}{n}$$

em que:

C: massa de caldo a ser evaporado em kg/h;

B_c : concentração do caldo clarificado em °Brix;

B_x : concentração do xarope produzido em °Brix;

S: quantia de vapor sangrado no primeiro efeito (pré-evaporador) em kg/h;

n: número de efeitos.

Como exemplo, considera-se uma evaporação composta de uma caixa de pré-evaporação seguida de um quádruplo efeito ($n = 4 + 1 = 5$) que processa (C) 1.000 kg/h de caldo (± 1 t de cana/h) a 16 °Brix (B_c), o qual é evaporado gerando um xarope (B_x) a 60 °Brix. Na caixa de pré-evaporação é “sangrado” (S) 120 kg/h de vapor para os aquecedores de caldo. Calcular o vapor consumido na evaporação (V).

$$V = \frac{[C(1 - B_c/B_x) + S(n - 1)]}{n}$$

$$V = \frac{[1.000(1 - 16/60) + 120(4 + 1)]}{5}$$

$$V = 267 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

No setor de cozimento, a demanda de vapor é de difícil cálculo por se tratar de uma operação realizada, em sua maior parte, de forma descontínua, em bateladas. Mas na prática podem-se utilizar parâmetros práticos, como os valores médios de demanda de vapor por t de cana utilizada efetivamente para a produção de açúcar (não considerando a cana processada para produção de álcool direto):

- cozimento em duas massas: 166,8 kg por t;
- cozimento em três massas: 155,3 kg por t.

Além das citadas, existem outras operações industriais que consomem vapor de escape para gerar calor na produção de açúcar, que seriam:

- aquecimento do caldo tratado na entrada do pré-evaporador;
- secagem (o consumo de vapor na secagem varia de 2 a 3 kg por 100 kg de açúcar processado, ou de 1 a 1,5 kg por saco de 50 kg de açúcar);
- centrífugas;
- aquecimento da água para a caldeira;
- eventuais.

Na produção de álcool, a grande consumidora de vapor de escape é a destilação. Essa demanda está bastante vinculada ao teor alcoólico do vinho, ou seja, quanto maior for esse teor, menor será o consumo de vapor na coluna de destilação. A demanda média, considerando um vinho com teor de 7 a 8 °GL, pode ser vista a seguir:

Tabela 8.5 Demanda de vapor nas colunas de destilação e retificação.

Coluna A, A' e D	2,0 a 2,5 kg/litro de álcool
Coluna B e B'	1,0 kg/litro de álcool
Total	3,0 a 3,5 kg/litro de álcool

Na desidratação do álcool, a demanda de vapor depende da tecnologia adotada, que seria o processo por ciclohexano, por monoetileno glicol (MEG) ou por peneira molecular. No caso da desidratação por peneira molecular, o vapor utilizado deve apresentar uma pressão de 10 kg/cm², ou seja, o seu consumo não é de vapor de escape, mas de vapor de alta pressão que deve ser rebaixada. Na Tabela 8.6, a seguir, encontram-se os consumos para esses três tipos de tecnologias:

Tabela 8.6 Consumo de vapor por processo de desidratação do álcool.

Processo por cicloexano	
Coluna C (vapor a 1,5 kg/cm ²)	1,0 kg/litro de álcool
Coluna P (vapor a 1,5 kg/cm ²)	0,6 kg/litro de álcool
Total	1,6 kg/litro de álcool
Processo por monoetileno glicol	
Coluna C (vapor a 10,0 kg/cm ²)	0,6 kg/litro de álcool
Coluna R (vapor a 1,5 kg/cm ²)	0,2 kg/litro de álcool
Total	0,8 kg/litro de álcool
Processo por peneira molecular	
Aquecedor/evaporador (vapor a 10,0 kg/cm ²)	0,60 kg/litro de álcool
Total	0,60 kg/litro de álcool

8.6 Balanço energético global

Com os valores dos consumos de vapor, tanto direto como de escape, pode-se elaborar uma tabela em que esses valores fiquem totalizados. Em geral, a demanda de vapor de escape é maior que a de vapor direto, ou seja, a sua produção não atende o consumo. Dessa forma, é necessário desviar certa quantidade de vapor direto, que tem sua pressão rebaixada e complementa as demandas de vapor de baixa pressão. Tendo o total de demanda de vapor de alta pressão, pode-se dimensionar a(s) caldeira(s) geradora(s).

Na tabela, deve-se também incluir uma coluna em que conste o vapor vegetal gerado pela caixa de pré-evaporação, que é consumido especialmente pelos aquecedores primários de caldo. Não deve ser esquecido que esse esquema é uma das possibilidades, podendo existir outros arranjos em função das necessidades térmicas da indústria, como uma refinaria de açúcar anexa, por exemplo. Na tabela, pode-se ver um exemplo de balanço global consolidado. Nela, os valores estão calculados para o processamento de uma t de cana por hora.

Pelos valores consolidados na tabela, pode-se ver que uma usina nessa configuração consome um total de 575 kg de vapor por t de cana processada. Assim, se a usina processa 750 t de cana por hora, suas caldeiras deverão produzir:

$$750 \left(\frac{t}{h} \right) \cdot 575 \left(\frac{kg}{t} \right) = 431.250 \frac{kg \text{ de vapor}}{\text{hora}}$$

Tabela 8.7 Balanço de vapor global de uma usina de açúcar.

Item	Vapor direto		Vapor escape		Vapor vegetal	
	Produção	Consumo	Produção	Consumo	Produção	Consumo
Caldeira	575	*	*	*	*	*
Preparo	*	84	80	*	*	*
Moagem	*	224	213	*	*	*
Turbogerador	*	174	165	*	*	*
Aquecimento 1	*	*	*	*	*	120
Aquecimento 2	*	*	*	35	*	*
Evaporação	*	*	*	267	120	*
Cozimento	*	*	*	167	*	*
Destilaria	*	*	*	70	*	*
Eventuais (5%)	*	12	12	12	*	*
Balão de escape	*	81	81	*	*	*28
Total	575	575	551	551	120	120 ²⁸

Deve-se considerar que, do total de bagaço produzido, 5% deve ser separado e armazenado para ser utilizado nas diversas paradas e reinícios da indústria, além de uma quantia para formar um estoque para o início da safra seguinte.

Uma caldeira otimizada produz no mínimo 2,2 kg de vapor por kg de bagaço queimado, assim, para gerar 588 kg/h de vapor, será necessário queimar 267 kg/h de bagaço. O consumo de vapor no processo, que no exemplo é de 575 kg/t, pode assumir valores mais baixos, existindo unidades operando com até 400 kg/t.

Existe tecnologia para baixar ainda mais esse valor, mas se o objetivo é a produção de um açúcar de alta qualidade ou refinado, álcool desidratado ou refinado, além de outros subprodutos, torna-se difícil baixar a demanda de energia para valores inferiores a 400 kg/t.

O consumo específico de vapor nas turbinas vai depender das condições de pressão e de temperatura do vapor, bem como da eficiência das próprias turbinas. Cada vez mais será compensador passar a usar turbinas de reação em lugar das tradicionais turbinas de ação. Admitindo um vapor com 66 bar/515 C, as turbinas de contrapressão têm um consumo aproximado de 5,7 kg/kW · h e as turbinas de condensação têm um consumo aproximado de 4,0 kg/kW · h, e neste último valor já está sendo considerado o consumo de energia parasita (bombas e torres para a água de resfriamento). Ao se fazer as contas, vê-se que se pode gerar até 107 kW · h/tc ($400/5,7 + 150/4 = 107,7$).

Normalmente, o consumo de energia elétrica nas usinas com moendas varia de 30 a 35 kW · h/tc. Mais ou menos a metade desse valor é consumida nas instalações de preparação e de extração do caldo, e a outra metade nos inúmeros motores elétricos da instalação. Em usinas com difusor, esse valor global fica na faixa de 25 a 30 kW · h/tc.

Considera-se uma usina com moendas e adota-se um valor médio de consumo de 32,7 kW · h/tc. O saldo de energia elétrica para ser comercializado ficaria em $107,7 - 32,7 = 75$ kW · h/tc. Se a pressão do vapor for aumentada para 100 bar, pode-se chegar ao número 80 kW · h/tc.

Uma usina que seja instalada tendo como objetivo a produção de açúcar, álcool e também de energia elétrica (cogeração) segue um fluxograma de energia no qual todo o vapor gerado por uma caldeira de alta pressão é utilizado para acionar um turbo gerador de grande tamanho. A energia elétrica é então utilizada para acionar as moendas e o preparo da cana. Nesse caso, podem ser utilizadas turbinas de alta eficiência para acionar esse gerador, maximizando os excedentes de energia elétrica.

Na Figura 8.1 é apresentado um fluxograma simplificado de uma usina totalmente eletrificada, conforme descrito. Na Tabela 8.8 é apresentado o balanço global de energia desse tipo de unidade industrial.

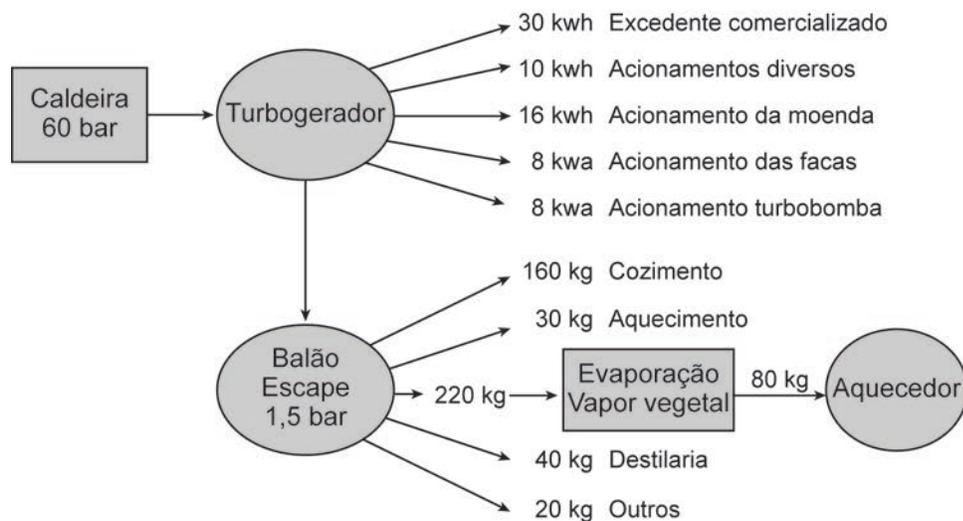


Figura 8.1 Usina de açúcar que gera excedente de energia elétrica.

Tabela 8.8 Balanço energético global de uma usina com elevada cogeração.

Item	Vapor direto		Vapor escape		Vapor vegetal	
	Produção	Consumo	Produção	Consumo	Produção	Consumo
Caldeira	551	*	*	*	*	*
Preparo	*	*	*	*	*	*
Moagem	*	*	*	*	*	*
Turbogerador	*	520	520	*	*	*
Aquecimento 1	*	*	*	*	*	120
Aquecimento 2	*	*	*	35	*	*
Evaporação	*	*	*	267	120	*
Cozimento	*	*	*	167	*	*
Destilaria	*	*	*	70	*	*
Eventuais (5%)	*	*	*	12	*	*
Balão de escape	*	31	31	*	*	*36
Total	551	551	551	551	120	120 ³⁶

REFERÊNCIAS

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 36, de 6 de dezembro de 2005. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, 07 dez. 2005. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/dezembro/ranp%2036%20-%202005.xml>. Acesso em: 18 jul. 2011.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (Consecana). *Manual de Instruções*. Piracicaba: Consecana, 2006.

HUGOT, E. *Manual da Engenharia Açucareira*. São Paulo: Mestre Jou, 1969. 1197 p.

OLIVEIRA, D. T.; ESQUIAVETO, M. M. M.; SILVA Jr., J. F. Impacto dos itens da especificação do açúcar na indústria alimentícia. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Campinas, v. 27, suppl. 1, 2007. p. 99-102.

SOUTHERN AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS ASSOCIATION. *Laboratory Manual*. Disponível em: <<http://sugartech.co.za/extraction/bagasse/CV/index.php>>. Acesso em: 1 jan. 2010.

SOBRE OS AUTORES

Cláudio Hartkopf Lopes

Engenheiro químico pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Mestre em Ciências e Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (USP) de Piracicaba, SP. Professor no Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges

Bacharel em química pela USP, Mestre em Química Analítica pela USP de São Carlos e Doutora em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Professora do Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar.

