



Economia energética por medição de cor em linha do açúcar à saída das centrífugas no processo de refinação da rama de açúcar

AMÉLIA MARIA DE ANDRADE FERRAZ

Novembro de 2011

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

“Economia energética por medição de cor em linha do açúcar à saída das centrífugas no processo de refinação da rama de açúcar”

Amélia Ferraz

Orientador : Maria João Gonçalves

NOVEMBRO DE 2011

Agradecimentos

Quero agradecer à minha orientadora, Eng^a Maria João Gonçalves, por me ter incentivado a avançar com esta tese e ter aceite orientar a mesma, ao Eng^o José Manuel Chorão por todo o apoio técnico prestado, ao Bjarne Nielsen por me ter dado oportunidade de trabalhar no tema apresentado e à Ritinha e à Carolina por me atualizarem nas novas ferramentas de formatação de texto.

Resumo

O processo de transformação de rama de açúcar em açúcar branco, além de ter como objetivo tornar o açúcar um produto com qualidade alimentar, pretende também remover os corantes que podem já existir na matéria prima, ou que são formados durante o processo de refinação. A cor do açúcar final obedece a legislação nacional e europeia e é, sem dúvida, um parâmetro de extrema importância para alguns clientes industriais que utilizam o açúcar como ingrediente nos seus produtos.

De modo a garantir que todo o açúcar está de acordo com a especificação de cor, é habitual produzi-lo com cor bastante abaixo do limite especificado. Esta prática, além de não ser valorizada pelo cliente, aumenta os custos de produção, quer pelo aumento de consumo de água e vapor, quer pela redução da capacidade global de produção.

O procedimento mais comum para controlar a cor do açúcar é recolher periodicamente uma amostra na linha de produção e analisar a cor em laboratório. A amostra representa uma pequena quantidade de todo o açúcar produzido e o resultado da análise só é conhecido muito depois de o açúcar ter sido enviado para outras etapas da refinação ou, eventualmente, para o silo de armazenamento. Deste modo, é habitual trabalhar-se com grandes margens de segurança, de forma a garantir que todo o açúcar produzido se encontra dentro dos valores de cor especificados.

O controlo da cor em linha, após a centrifugação, fornece informação de cor referente à quantidade total do açúcar produzido. Assim, permite não só produzir açúcar com cor muito perto do limite especificado e obter benefícios de redução de custos, como também possibilita produzir um açúcar com qualidade mais homogénea.

Neste trabalho pretendem-se calcular, numa aplicação específica, os benefícios económicos da redução do consumo de água e vapor no processo global de refinação, assim como do aumento da capacidade de produção, quando se produz açúcar com cor perto dos limites especificados, através de um controlo de cor em linha.

Os resultados obtidos mostram que a redução de custos é significativa e a sua aplicação prática poderá ter grande impacto no custo final de produção do açúcar.

Palavras Chave: Açúcar, Água, Vapor, Centrifugação, Colorímetro, Cor UI, Cor em linha, Energia, Perfil de cor, Optimização.

Abstract

The industrial process of producing white sugar from raw sugar, besides aiming to produce a food quality product, aims to remove sugar colorants that may already exist in the raw material or be formed during the refining process. The final sugar color must comply with national and European legislation and is undoubtedly an extremely important parameter for some industrial customers, who need to incorporate it as an ingredient in their products.

In order to ensure that all the sugar complies with color specifications, the practice is to produce it with a much lower color than the specified limit. This practice, besides not being recognized by the customer as leading to a better sugar quality, increases production costs, either by increasing water and steam consumption or by reducing production.

The most common procedure to color control is to collect and periodically analyze the color of a sample in the laboratory. The sample amount has a very low significance of all sugar produced and the results of analysis are known a long time after being sent to other lines, to drying and screening, or eventually to the storage silo. This is the reason why it is so common to work with large safety margins, because it ensures that all sugar produced is within color limits.

The online color control, after the centrifugals discharge, as well as the available information on the color of 100% of the sugar produced, not only allows the production of sugar with color close to limits, with subsequent cost reduction benefits, but also makes possible to obtain a sugar with a more homogeneous quality.

There are several sugar plants that already have a device to control the color online. However, it is only used to ensure that 100% of sugar is controlled and is within the specified limits.

This work aims to calculate, on a specific application, the economic benefits in the refining process that can be obtained by water and steam consumption decrease, as well as the increased production capacity, when working much closer to color limits.

The results clearly show a significant cost reduction and its practical application may have a high impact on the sugar production final costs.

Key words: Centrifugals, Colour profile, Colour, Colour UI, Online Colour, Energy, Optimization; Sugar, Steam, Water

Índice

1	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento e Apresentação do Projeto.....	1
1.2.	Contributos do Trabalho.....	2
2	Descrição do Processo de Refinação do Açúcar.....	4
2.1.	Da Cana à Rama de Açúcar.....	4
2.2.	As etapas da refinação.....	4
I.	AFINAÇÃO.....	5
II.	CARBONATAÇÃO.....	6
III.	DESCOLORAÇÃO.....	7
IV.	EVAPORAÇÃO.....	7
V.	CRISTALIZAÇÃO.....	7
VI.	CENTRIFUGAÇÃO.....	8
VII.	SECAGEM.....	9
VIII.	CLASSIFICAÇÃO.....	9
IX.	ARMAZENAGEM.....	9
X.	RECUPERAÇÃO.....	10
2.3.	A cor.....	11
2.4.	Centrifugação.....	12
3	Descrição do trabalho realizado.....	19
3.1.	O colorímetro.....	19
3.2.	Informação fornecida pelo Colorímetro.....	21
4	Procedimento utilizado para o levantamento de dados.....	25
5	Resultados obtidos.....	29
5.1.	Levantamento de dados relativos a valores médios de cor - histórico.....	29
5.2.	Resultados relativos a caudal de água dos injetores.....	29
5.3.	Resultados relativos a tempos de água de lavagem para diferentes valores de cor	29
5.4.	Tempos de lavagem do açúcar para diferentes cores UI.....	30
5.5.	Xarope rejeitado e açúcar dissolvido no xarope para cada tempo de água de lavagem.....	31
5.6.	Rendimento (η) da centrifugação para cada tempo de água de lavagem/cor de açúcar descarregado.....	31
5.7.	Consumos globais de água e vapor e açúcar reprocessado para os diferentes rendimentos das centrífugas.....	32

5.8.	Capacidade de produção e consumos de água e vapor por comparação com os consumos para açúcar com 45 UI	33
5.9.	Custos de produção para os diferentes cores de açúcar produzido	33
5.10.	Aumento dos custos de água e vapor para uma capacidade de 300000 t/ano de rama de açúcar.....	34
5.11.	Redução de custos e aumento de capacidade de produção por redução de 1 segundo no tempo de lavagem nas centrífugas.....	35
6	Discussão dos Resultados.....	37
7	Conclusões.....	39
8	Perspetivas de trabalhos futuros	41
Anexo A	49
Anexo B	61

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1.	Descrição esquemática do processo global de refinação	5
Figura 2.2.	Representação esquemática do processo de centrifugação.....	13
Figura 2.3.	Desenho esquemático de uma centrífuga	14
Figura 2.4.	Desenho esquemático dos injectores de uma centrífuga.....	18

Capítulo 3

Figura 3.1.	Esquema de funcionamento do Colorímetro	19
Figura 3.2.	Colorímetro	20
Figura 3.3.	Equipamento a medir a cor do açúcar num sistema de transporte	20
Figura 3.4.	Informação disponível no ecrã	21
Figura 3.5.	Problemas de funcionamento das centrífugas identificados pelo perfil de cor do açúcar durante a descarga das centrífugas (a).....	22
Figura 3.6.	Problemas de funcionamento das centrífugas identificados pelo perfil de cor do açúcar durante a descarga das centrífugas (b).....	23

Capítulo 4

Figura 4.1.	Exemplo de um balanço mássico à etapa de centrifugação	26
-------------	--	----

Capítulo 5

Figura 5.1.	Tempo de água de lavagem para diferentes valores de cor UI.....	30
-------------	---	----

Índice de Tabelas

Capítulo 5

Tabela 5.1. Tempo de água de lavagem para diferentes valores de cor UI do açúcar.....	30
Tabela 5.2. Açúcar dissolvido no xarope para cada tempo de água de lavagem	31
Tabela 5.3. Rendimento da centrifugação.....	31
Tabela 5.4. Açúcar reprocessado, consumos de água e vapor globais da refinação para os diferentes rendimentos das centrífugas.....	32
Tabela 5.5. Redução da capacidade de produção e aumento dos consumos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI	33
Tabela 5.6. Aumento dos custos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI	33
Tabela 5.7. Aumento dos custos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI para uma capacidade de 300000 t/ano de rama de açúcar	34
Tabela 5.8. Redução de consumo de água e vapor e aumento de capacidade por redução de 1 s no tempo da água de lavagem	35

Índice de Equações

Capítulo 2

Equação 2.1	11
Equação 2.2	11
Equação 2.3	16
Equação 2.4	16
Equação 2.5	18

Siglas e Abreviaturas

Abs	absorvância da solução	
b	percurso ótico da célula	cm
Brix	percentagem de sólidos dissolvidos	
Brix _e	brix à entrada	
Brix _{sat}	brix de saturação	
Brix _{xr}	brix do xarope rejeitado	
c	concentração da solução	g/L
cp	capacidade calorífica	kJ/kg °C
C _{UI}	cor em unidades ICUMSA	UI
CV	coeficiente de variação	
cp _{mA}	capacidade calorífica do açúcar	MJ/t °C
cp _{m centrifugação}	capacidade calorífica da massa à entrada da centrifugação	MJ/t °C
cp _{xr}	capacidade calorífica do xarope rejeitado	MJ/t °C
cp _{H2O}	capacidade calorífica da água	MJ/t °C
d	diâmetro	m
G	número de forças g (aceleração da gravidade)	
g	aceleração da gravidade	m/s ²
hum _A	percentagem de humidade do açúcar	%
H	entalpia	J
H _{xr}	entalpia do xarope rejeitado	J
H _{me}	entalpia da massa entrada na centrifuga	J
H _{mA}	entalpia da massa de açúcar	J
HADP	<i>hexose alkaline degradation products</i>	
H ₂ O _A	água no açúcar	
H ₂ O _{me}	água na massa entrada na centrifuga	
H ₂ O _{xr}	água no xarope rejeitado	
ICUMSA	<i>International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis</i>	
m	massa	kg ou t
m _A	massa do açúcar	kg ou t
m _{A_{ms}}	matéria seca na massa	kg ou t
m _{centrifugação}	massa na centrifugação	kg ou t
m _e	massa entrada	kg ou t
m _{etapa anterior}	massa da etapa anterior	kg ou t
m _S	massa de sacarose	kg ou t

mS_{ad}	massa de sacarose no açúcar descarregado	kg ou t
mS_e	massa de sacarose entrada na centrífuga	kg ou t
mS_{xr}	massa de sacarose no xarope de refinação	kg ou t
mH_{20}	massa de água	kg ou t
mH_{20A}	massa de água no açúcar	kg ou t
$mH_{20_{me}}$	massa de água na massa entrada	kg ou
$mH_{20_{lc}}$	massa de água na lavagem da centrífuga	kg ou t
mXR	massa de xarope rejeitado	kg ou t
nm	namómetros	
NS	não açúcares	%
P_a	pureza do açúcar	%
P_e	pureza à entrada	%
P_{xr}	pureza do xarope rejeitado	%
Q	caudal volumétrico	L/min
r	raio do cesto da centrífuga	m
S_{ad}	sacarose no açúcar descarregado	
S_e	sacarose à entrada	
S_{xr}	sacarose no xarope rejeitado	
t	tempo	s ou min
ton	tonelada	
TV	tacho de vácuo	
T	temperatura	°C
$T_{H_{20_{lc}}}$	temperatura da água de lavagem na centrífuga	°C
T_A	temperatura do açúcar	°C
T_{xr}	temperatura do xarope rejeitado	°C
V	volume	m^3
UI	unidades ICUMSA	
u	velocidade linear	m/s
V/V	percentagem volúmica	%
ω	velocidade de rotação	radianos/s
ε	porosidade	
μ	viscosidade dinâmica	Pa.s
μm	microns	
ρ	massa específica	kg/m^3
η	rendimento	%
η_p	rendimento do processo	%

1 Introdução

1.1. Enquadramento e Apresentação do Projeto

Idealmente, de modo a consumir o mínimo de energia, uma fábrica de açúcar deveria produzir açúcar de qualidade uniforme e com a especificação exata solicitada pelo cliente.

No entanto, no mundo real, existem muitos fatores que dificultam a produção de qualidade uniforme. As características dos licores de açúcar variam de acordo com o tipo de matéria prima utilizada, a qual tem uma grande influência nos processos anteriores à centrifugação, nomeadamente na carbonatação e na cristalização.

O açúcar produzido fora dos limites de cor especificados pode ser sujeito a uma penalização no preço a ser pago pelo cliente, ou mesmo ser rejeitado. De forma a evitar que tal ocorra, é prática comum produzir açúcar com uma qualidade bastante superior à requerida pela especificação técnica. Contudo, infelizmente, trabalhar com uma grande margem de segurança não garante que todo o açúcar produzido se encontre dentro dos limites estabelecidos pelo cliente. Além disso, o cliente não está disposto a pagar um preço mais elevado pelo facto de estar a receber um açúcar com uma qualidade superior à que solicitou.

Trabalhar com uma alta margem de segurança, não só tem custos elevados como implica uma capacidade de produção superior, maior consumo energético e utilização de uma maior quantidade de auxiliares tecnológicos.

A redução da margem de segurança ao mínimo possível, para além de reduzir os custos de produção, vai de encontro a um sistema de produção mais sustentável.

Das características definidas para o açúcar com base na legislação ou mesmo com base nos requisitos do próprio cliente, a cor é sem dúvida a mais importante. Aumentos nos valores de cor são uma indicação de problemas no processo de fabrico.

A medição da cor dos cristais de açúcar em contínuo e em tempo real, logo após o açúcar ser descarregado das centrífugas, para além de garantir que todo o açúcar produzido tem as características físico químicas de acordo com a especificação técnica definida, permite avaliar as variações no desempenho de cada centrífuga, assim como dos tachos de vácuo (equipamento onde ocorre a etapa de cristalização).

Devido a problemas com variações rápidas na qualidade do açúcar, muitas fábricas são obrigadas a aceitar o facto de estarem frequentemente a fornecer açúcar com uma

qualidade substancialmente superior à requerida, aumentando desta forma os seus consumos energéticos.

Após a primeira etapa do processo da refinação, a afinação, a rama é dissolvida para posteriormente passar na fase líquida pelas fases seguintes. Nestas fases, as etapas de dissolução, carbonatação, evaporação e, em especial, a cristalização, consomem vapor como fonte de energia.

Os consumos energéticos são os consumos que maior impacto têm nos custos finais de produção, razão pela qual estes consumos são medidos e analisados com muita frequência, com o objetivo de encontrar novas tecnologias/equipamentos com maior eficiência energética. Para além da questão dos custos, as indústrias têm cada vez mais de se preocupar em utilizar as melhores tecnologias disponíveis de forma a darem resposta aos requisitos ambientais em vigor.

O trabalho realizado, assim como todo o conjunto de informações recolhidas que a seguir se apresentarão, teve como objetivo calcular a economia energética por controlo em linha da cor do açúcar à saída das centrífugas, bem como a utilização da informação do perfil de cor ao longo da descarga das mesmas para diagnóstico de problemas que ocorrem frequentemente nos equipamentos, neste caso, com maior incidência nas centrífugas.

Os resultados obtidos mostram que o controlo em linha da cor do açúcar em tempo real, não só permite o controlo mais apertado e eficiente da qualidade do açúcar, como permite aumentar a capacidade de produção e otimizar o funcionamento das centrífugas, tendo como consequência a redução dos custos de produção, pelo aumento da capacidade de produção e redução dos consumos de água e energia.

1.2. Contributos do Trabalho

A medição da cor em linha tem sido utilizada pela indústria do açúcar, essencialmente, para controlo de cor do açúcar produzido.

O método tradicional e mais frequente é efetuar uma recolha manual de uma amostra de açúcar à saída das centrífugas com uma frequência horária ou ainda mais alargada.

A amostra recolhida é posteriormente analisada em laboratório e cerca de 30 minutos após obtenção do resultado, este é enviado para o operador das centrífugas, para ajuste da quantidade de água de lavagem nas mesmas.

Uma fábrica que produza cerca de 1000 ton/dia de açúcar e que recolha cerca de 50 gramas de amostra de 1/1 hora, controla 0,00012 % do açúcar que produz.

O ajuste da água é feito por *batch* de cristalização, que, no caso concreto da fábrica onde se recolheram os dados para este trabalho, corresponde a cerca de 18 ton de açúcar.

Devido à baixa representatividade da amostra analisada, o procedimento habitual, para não correr riscos de produzir açúcar fora dos limites da cor especificada, é produzir açúcar com uma cor média bastante inferior ao limite admissível.

O operador do setor sabe que as cargas de massa que alimentam as centrífugas podem variar, não só em quantidade, como em qualidade (viscosidade, granulometria do açúcar, entre outras). A prática comum é pois trabalhar com uma grande margem de segurança, para minimizar a probabilidade de produzir açúcar com uma cor acima do limite especificado.

Se por um lado a lavagem excessiva vai dissolver açúcar, gerando mais xaropes, reduzindo a capacidade de produção e aumentando os consumos de energia, água e auxiliares tecnológicos, uma lavagem insuficiente vai deixar uma camada de xarope á volta dos cristais, reduzindo a sua pureza em sacarose e aumentando o teor em cinzas e a probabilidade de empedramento na armazenagem na fábrica ou no cliente.

2 Descrição do Processo de Refinação do Açúcar

2.1. Da Cana à Rama de Açúcar

Nas refinarias de açúcar a Rama de Açúcar é a matéria prima. A Rama de Açúcar é produzida a partir da cana do açúcar, a qual é cultivada essencialmente na África e América do Sul. A cana de açúcar é cortada, esmagada e misturada com água, para extração do açúcar existente na planta. De seguida, separa-se o líquido açucarado das fibras da cana e purifica-se este líquido através de um processo semelhante à refinação: é tratado com cal, depurado e concentrado em evaporadores de múltiplo efeito. O xarope obtido nos evaporadores é cristalizado, obtendo-se a Rama de Açúcar.

A Rama é composta por cristais de sacarose, os quais têm uma película de xarope envolvente. Embora a película de xarope tenha grande quantidade de corantes e impurezas que se pretendem remover no processo de refinação, permite o transporte da rama a granel, pois protege-a das oscilações climatéricas das diferentes zonas geográficas por onde vai passando.

A Rama de Açúcar é transportada do porto marítimo para as refinarias, diretamente, através de transportadores de banda, e armazenada em grandes armazéns ou silos, ou, caso a refinaria não esteja situada à beira do porto marítimo, transferida para camiões e transportada para o armazém ou silo existentes na refinaria.

2.2. As etapas da refinação

A figura 2.1. representa, de forma esquemática, o processo global de refinação da rama de açúcar e respetivas etapas, que se passam de seguida a descrever.

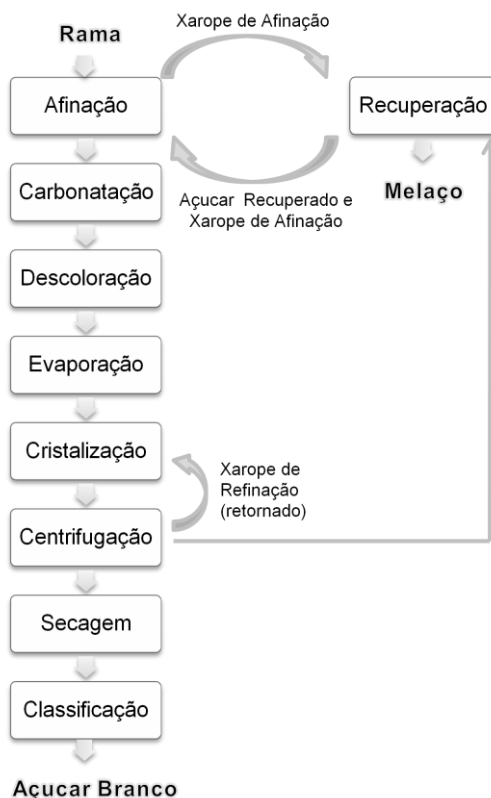


Figura 2.1. Descrição esquemática do processo global de refinação

I. AFINAÇÃO

A primeira etapa da refinação da Rama de Açúcar é a Afinação. Nesta operação efectua-se a remoção da camada de xarope que envolve os cristais da Rama de Açúcar.

A mistura produzida por adição de xarope da afinação à Rama de Açúcar designa-se por Magma de Afinação. O tempo de contacto entre o xarope e a Rama de Açúcar, assim como a temperatura do processo, devem ser controlados de forma a que a camada de xarope que circunda os cristais amoleça, facilitando a sua separação na centrifugação, mas assegurando que não se vai arrastar a sacarose do cristal para o xarope. Para evitar que ocorra a inversão química da sacarose, formando-se açúcares invertidos, deve-se manter o pH alcalino.

O controlo de pH é feito por adição de leite de cal ao xarope de afinação que é rejeitado na fase seguinte, na centrifugação.

O Magma da Afinação é centrifugado, separando-se a rama lavada do xarope, designado por Xarope da Afinação, o qual é recirculado para se misturar com a rama que está a ser alimentada ao processo para formar o Magma da Afinação.

Como o processo de centrifugação separa o xarope envolvente do cristal, acrescido daquele que é adicionado na amassadora, existe um excesso de Xarope de Afinação. Este excesso é enviado para o setor de Recuperação. Na Recuperação, o Xarope da Afinação, juntamente com outros xaropes rejeitados de outras fases do processo, são cristalizados, para recuperação do açúcar neles contido, o qual é dissolvido em água e águas doces, formando-se o Licor da Recuperação.

A rama lavada resultante da centrifugação, é dissolvida e misturada com o Licor da Recuperação e com os retornos de açúcar, provenientes essencialmente das fases finais do processo - secagem e peneiração. A dissolução é feita em águas doces, num dissolvedor, sendo o produto resultante o Licor da Afinação. Nesta operação é essencial o controlo da concentração do licor. Se por um lado é importante que o licor tenha uma concentração baixa, para facilitar o processo de filtração por que vai passar á frente, por outro, a água/águas doces adicionadas irão ser evaporadas na cristalização, que é a etapa onde existe um maior consumo de vapor.

II. CARBONATAÇÃO

Após a sacarose ter passado à fase líquida, Licor da Afinação, vai ser sujeita à principal etapa de higienização e descoloração, a Carbonatação. Nesta etapa é adicionado cerca de 3% (V/V) de leite de cal (mistura de hidróxido de cálcio em água) ao licor, promovendo-se desta forma o borbulhamento de dióxido de carbono. Da reação química entre o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio, forma-se um precipitado de carbonato de cálcio. O valor elevado de pH do licor, devido á adição do leite de cal, destrói a flora microbiana que possa existir e a precipitação arrasta os componentes insolúveis e compostos de alto peso molecular que serão separados do licor, por filtração, na etapa que se segue.

A filtração é feita normalmente em filtros tipo “prensa”, usando telas de filtração específicas para retenção dos cristais de carbonato de cálcio formados. O licor filtrado designa-se por Licor Carbonatado. O precipitado retido é lavado, para extração do açúcar que ainda possa conter e, em algumas refinarias, sujeito ainda a uma segunda filtração para remoção quase total do açúcar. As águas de lavagem são enviadas para o dissolvedor, e o precipitado, designado por Lama de Carbonatação, é utilizado para correção de pH de solos agrícolas e cimenteiras, entre outras aplicações.

O Licor Carbonatado, à saída da filtração, está em condições de higienização para ser consumido como produto alimentar. No entanto, embora a etapa de carbonatação remova uma grande parte dos corantes do licor, este ainda tem que ser sujeito a uma etapa suplementar de descoloração para que seja possível produzir açúcar branco.

III. DESCOLORAÇÃO

A Descoloração é uma operação que consiste na remoção de compostos corados do licor. Os processos de descoloração mais comuns são a passagem do licor ou por resinas de permuta iónica, ou por carvão ativado.

A maior parte dos compostos que dão cor às soluções de açúcar são ácidos orgânicos, os quais, em meio alcalino, apresentam uma carga negativa. A descoloração por passagem por resinas, consegue-se trocando o ião corado por outro descorado (o ião cloreto). Após cada ciclo de descoloração por resinas, cuja duração depende da cor e tipo de corantes da Rama de Açúcar, e expulsão de todo o licor do leito da resina, esta é regenerada por passagem de uma solução de cloreto de sódio (com concentração de 110 g/L) para reposição do ião cloreto.

Quando a descoloração é feita por carvão ativado, após cada ciclo de passagem de licor pelo leito de carvão, o licor é expulso e o carvão regenerado por queima (entre 900 e 1000°C) da matéria orgânica retida.

IV. EVAPORAÇÃO

Após descoloração, o licor, designado por Licor Final, com cerca de 63 Brix (percentagem de sólidos dissolvidos) é concentrado até cerca de 74 Brix por evaporação da água em Evaporadores de múltiplo efeito. No primeiro efeito o licor é aquecido por vapor através de uma calândria de aquecimento. Os vapores resultantes desta evaporação vão servir para alimentar a calândria do segundo efeito.

V. CRISTALIZAÇÃO

O Licor Concentrado saído dos Evaporadores é enviado para os Tachos de Vácuo para de seguida ser cristalizado.

Nos Tachos de Vácuo o licor é concentrado, sob vazio, para que a evaporação ocorra a uma temperatura entre os 65 e 75°C e até uma sobressaturação de 1,1 – 1,2.

Atingindo o ponto de sobressaturação e para que não comecem a surgir espontaneamente cristais, adiciona-se ao licor concentrado uma mistura de açúcar moído em álcool, designada por sementeira. A moagem do açúcar é feita em álcool para que o pó de açúcar

se mantenha em cristais e não se dissolva no líquido. Durante a cristalização o Tacho de Vácuo é constantemente alimentado com mais licor de modo a manter a sobressaturação e a obrigar os cristais a crescerem. No final desta operação, normalmente chamada de cozedura, obtém-se uma massa de açúcar, a Massa Cozida, que é descarregada para mexedores/transportadores antes de ser centrifugada.

Existem vários esquemas de cristalização/cozedura. O mais comum é o designado por "Esquema de Três Cozeduras". Na primeira, o Tacho de Vácuo é alimentado com licor concentrado. Após cristalização e obtenção da massa cozida, obtém-se o açúcar, designado de açúcar de primeiro jato e o xarope, designado de xarope de primeiro jato. Este xarope é alimentado a um segundo Tacho, obtendo-se, desta segunda cozedura, o açúcar de segundo jato e o xarope de segundo jato. O xarope de 2º jato é alimentado a um terceiro tacho. O xarope resultante da terceira cozedura é enviado para o setor da recuperação e os açúcares obtidos da primeira, segunda e terceira cozeduras são comercializados separadamente ou misturados num único produto.

Um outro processo possível, designado por "Cozedura com Retorno de Xarope ", é o mais utilizado em Portugal. Neste, o Tacho de Vácuo é primeiro alimentado com Licor Concentrado até se iniciar a formação dos cristais, continuando-se depois a alimentar o Tacho com o xarope rejeitado da massa cozida após centrifugação, designado por Xarope de Refinação. A recirculação do Xarope de refinação é feita enquanto o açúcar produzido se mantiver dentro dos limites de cor especificados. Quando os limites são atingidos, o Xarope de Refinação é enviado para o setor de Recuperação.

VI. CENTRIFUGAÇÃO

(para uma descrição mais detalhada, ver ponto 3.4.)

Na etapa seguinte, Centrifugação, dá-se a separação dos cristais do Xarope de Refinação envolvente.

A Massa Cozida proveniente da etapa anterior é centrifugada em centrífugas descontínuas, as Centrífugas de Refinação. O xarope rejeitado, Xarope de Refinação, é o proveniente da parte líquida contida na Massa Cozida, acrescida do açúcar resultante da dissolução pela água de lavagem durante a centrifugação. Os cristais de açúcar, ainda húmidos (com cerca de 0,8% de humidade), são enviados para o setor de Secagem.

VII. SECAGEM

O açúcar húmido, proveniente das Centrífugas de Refinação, é seco num Secador rotativo em duas etapas. Na primeira, o açúcar contacta em co-corrente com ar quente e na segunda, na parte final do secador, com ar frio. À saída do secador a humidade do açúcar varia entre 0,02 e 0,03%.

O Secador possui ainda, na zona de saída do açúcar, uma rede cuja finalidade é remover os cristais aglomerados.

O ar saído do secador passa por um ciclone onde se faz a separação do pó de açúcar por aspensão de águas doces quentes. O excesso destas águas doces é utilizado para dissolver os retornos de açúcar rejeitados pelo secador e peneiros, formando-se uma solução açucarada que é de seguida enviada para o Dissolvedor.

VIII. CLASSIFICAÇÃO

Após a secagem o açúcar é classificado, por passagem através de peneiros vibratórios. O objetivo da peneiração é produzir um açúcar com os cristais com tamanho uniforme.

Na Classificação, o açúcar é separado do pó e conglomerados de açúcar. Esta operação é feita nos Classificadores, peneiros de três andares com redes de diferentes aberturas. Na rede superior ficam retidos os conglomerados e o pó de açúcar passa para a rede inferior. A fração rejeitada é dissolvida em águas doces e retornada para o Dissolvedor para reprocessamento.

Caso se pretenda obter um açúcar com diferentes características de granulometria, este passa por uma segunda etapa de Classificação, em que a abertura dos peneiros é escolhida em função da granulometria final desejada.

IX. ARMAZENAGEM

Após peneiração o açúcar é armazenado durante 36 a 48 horas em silos com humidade e temperatura controladas, de forma a fazer a sua estabilização e como tal evitar o seu empedramento.

Durante o período de estabilização, a humidade existente dentro do cristal vai migrar para a sua superfície e ser removida pelo ar seco que circula dentro do silo.

O açúcar armazenado nos silos é comercializado a granel, em camiões cisterna, ou enviado para o setor de embalagem, para enchimento de contentores de cerca de 1 ton, sacos de 50kg, 25kg, 1kg, saquetas, entre outras formas de apresentação.

X. RECUPERAÇÃO

Na Recuperação faz-se o aproveitamento do açúcar existente nos Xaropes de Afinação, Xaropes de Refinação rejeitados e Águas Doces. A Cristalização do açúcar contido nestes produtos é feita em quatro etapas:

- Pré-Primeira Recuperação;
- Primeira Recuperação;
- Segunda Recuperação;
- Terceira Recuperação.

As massas cozidas de cada cozedura são centrifugadas em centrífugas contínuas, produzindo um açúcar e um xarope. O açúcar é enviado para a cozedura precedente e o xarope é enviado para a cozedura seguinte.

O açúcar recuperado é dissolvido, no Dissolvedor da Recuperação, formando o Licor da Recuperação, o qual é misturado com o Licor da Afinação no Dissolvedor. O xarope da última cozedura - 3ª Recuperação – designado por Melaço, é rejeitado e é essencialmente comercializado para ser incorporado em rações animais.

2.3. A cor

A cor do açúcar é analisada em solução e pelo método ICUMSA (*International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis*) - ver anexo B - sendo definida como:

$$\text{Cor ICUMSA} = \frac{1000 \times \text{Abs}}{b \times c} \text{ UI} \quad \text{Equação 2.1}$$

em que:

Abs medida da absorvância da solução a 420 nm

b percurso óptico da célula, em cm.

c concentração da solução teste, em g/mL, obtida a partir da expressão:

$$c = \frac{\text{Brix} \times \rho}{10^5} \text{ g/mL} \quad \text{Equação 2.2}$$

em que:

ρ massa específica da solução em kg/m³

Brix percentagem de sólidos dissolvidos

A cor do açúcar branco pode variar entre 30 e 60 UI (Unidades ICUMSA), a do açúcar amarelo entre 2000 e 3000 UI, enquanto a matéria prima da refinação, a Rama de Açúcar, pode oscilar entre 1000 e 5000 UI.

Cor é a designação genérica usada para uma larga gama de componentes que contribuem para a cor do açúcar. A sacarose pura não tem cor; no entanto pode aparecer com mais ou menos cor devido à menor ou maior inclusão desses componentes no cristal de açúcar.

A maior parte dos compostos que dão cor ao açúcar são complexos difíceis de quantificar, motivo pelo qual a cor é medida como o efeito causado pela totalidade dos corantes existentes na absorção da luz.

Alguns dos corantes têm origem na matéria prima, a cana de açúcar, sendo os restantes formados durante o processo de transformação da cana de açúcar em rama de açúcar e, posteriormente, na refinação da rama para se obter o açúcar branco.

Os corantes de açúcar podem apresentar uma cor forte, escura, como as melaminas, ou cor clara, como alguns fenóis. Existem outros compostos que, embora não tenham cor, contribuem para a formação da mesma, como os açúcares invertidos, aminoácidos e compostos de ferro.

Os corantes principais da cana de açúcar são os pigmentos da cana e ácidos fenólicos. Os pigmentos da cana de açúcar são, na sua maioria, clorofilas, carotenos, xantofilas e flavonóides.

Os corantes formados no processo de produção são os caramelos, HADP (*Hexose Alkaline Degradation Products*) e melanoidinas. A formação de cor ocorre por uma série de mecanismos. Os caramelos, devido à ocorrência de caramelização, e os HADP devido à degradação alcalina da sacarose. Ambos os processos são promovidos por temperatura, ocorrendo a degradação alcalina também a valores elevados de pH e formando corantes muito escuros. A caramelização ocorre a partir de 120°C, enquanto a formação de HADP e melanoidinas ocorre a temperaturas mais baixas (Rein, 2007).

As melanoidinas são formadas por reações *de Maillard*, as quais ocorrem na presença de açúcares redutores e aminas, componentes que estão sempre presentes nos licores de açúcar.

A existência de ferro na rama de açúcar também contribui para a formação de cor, pois muitos compostos polifenólicos são produtores de complexos corados de ferro. Os compostos fenólicos e alguns outros corantes também podem formar complexos com polissacarídeos, aumentando a possibilidade de incorporar os corantes no cristal de açúcar. A origem, formação e resposta aos diferentes corantes nos processos de refinação são aspetos da maior relevância. Os corantes existentes no açúcar, apesar de representarem uma pequena fração de impurezas, são de grande importância sob o ponto de vista do consumidor.

A remoção de cor é a função mais importante de uma refinaria de açúcar. A relação entre a cor da rama de açúcar e a cor do açúcar final devem ser determinantes para o processo de refinação a utilizar.

2.4. Centrifugação

Já foi referido no ponto anterior que na etapa de centrifugação ocorre a separação dos cristais do Xarope de Refinação envolvente.

Esta etapa, para além de ser da maior relevância em termos da qualidade do produto final, é uma das etapas onde a otimização do processo tem um enorme impacto nos consumos energéticos globais da refinação do açúcar.

A figura 2.2 representa de forma esquemática o processo de centrifugação. Passa-se de seguida, a descrevê-lo de uma forma mais detalhada.



Figura 2.2. Representação esquemática do processo de centrifugação

Da cristalização resulta uma massa composta por cristais de açúcar e um xarope. Os cristais de açúcar são separados desse xarope por centrifugação. Devido à natureza do xarope, particularmente ao elevado conteúdo em sólidos dissolvidos (açúcar) e viscosidade, a força centrífuga necessária para separação destas duas fases tem que ser elevada.

O equipamento usado é usualmente referido como centrífuga ou máquina centrífuga.

Na indústria do açúcar existem essencialmente dois tipos de centrífugas, contínuas e descontínuas. Embora as centrífugas contínuas sejam mais simples de operar, quebram mais o cristal e como tal não são aconselháveis quando a granulometria uniforme do produto final é requerida.

A eficiência do processo de separação por centrifugação está condicionada pela qualidade da massa produzida na etapa anterior, a cristalização.

Devido ao facto das densidades do cristal de açúcar e do xarope serem semelhantes, assim como à elevada viscosidade do xarope, a opção da separação pelo processo de centrifugação é a mais adequada.

Os orifícios da rede da centrífuga são escolhidos de forma a reterem os cristais de açúcar que, em média, têm um tamanho entre 0,1 e 1,0 milímetros.

Por ação da força centrífuga, o xarope é purgado através dos espaços livres existentes entre a massa dos cristais; no entanto fica sempre uma camada residual e fina de xarope à volta dos cristais e nos interstícios entre os mesmos, motivo pelo qual é necessário proceder a uma lavagem final, onde, através de injetores incorporados na centrífuga, água ou vapor são utilizados para arrastar o xarope remanescente e fazer uma lavagem do açúcar na fase final da centrifugação – ver figura 2.3.

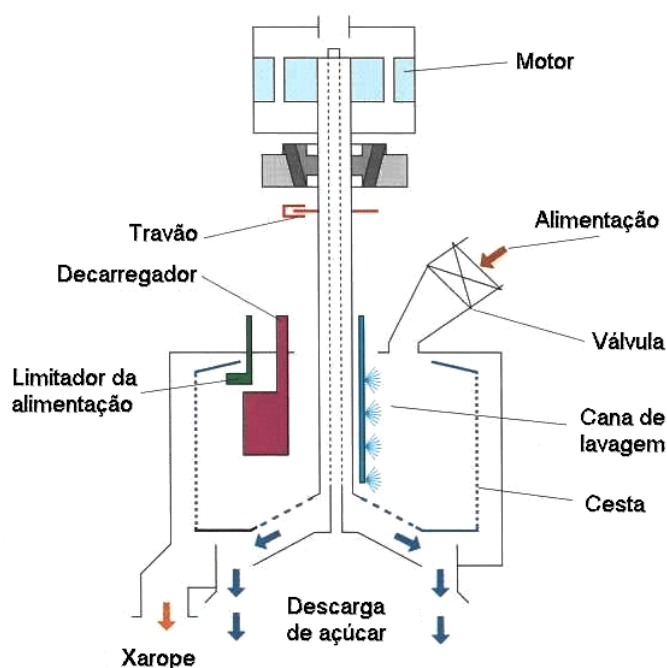


Figura 2.3. Desenho esquemático de uma centrífuga
(reproduzido de Rein, 2007)

A massa produzida na etapa da cristalização é descarregada para uma cesta cujo diâmetro varia entre 1,2 e 1,8 metros. A cesta é perfurada com orifícios que variam entre 3 a 6 milímetros, por onde é feita a purga do xarope. O açúcar fica retido na cesta e o tamanho dos orifícios é determinado pelo tamanho do cristal de açúcar que se pretenda produzir. Existe também uma segunda cesta na traseira da cesta que recebe a massa a centrifugar, que auxilia a drenagem do xarope. Na parte de baixo da cesta existe uma válvula que é mantida fechada durante as fases de carregamento e centrifugação e aberta no fim de cada ciclo, para descarga do açúcar centrifugado. O açúcar é “raspado” da cesta com um acessório, tipo “arado”, o qual é recolhido nas fases do ciclo de centrifugação em que não é utilizado.

Cada ciclo de centrifugação dura cerca de três minutos, incluindo o tempo necessário para carga da massa de açúcar a centrifugar e descarga do açúcar centrifugado.

A cesta tem instalada uma cana com injetores para lavagem do açúcar na fase final do ciclo de centrifugação.

As várias fases do ciclo de centrifugação são controladas automaticamente, através de PLC`s (*Programmable Logical Controller*) e têm normalmente a seguinte sequência:

- 1º - Na velocidade definida para carregamento da centrífuga, normalmente entre 150 e 240 min^{-1} , abre a válvula para alimentação da massa a centrifugar;

- 2º - A camada de massa na cesta é medida automaticamente e a válvula de alimentação fecha quando a espessura dessa camada atinge o valor especificado;
- 3º - Aceleração até ao valor máximo definido. A aceleração normalmente é de 1200 - 1500 min^{-1} para cestas de 1,2 metros de diâmetro e de 1000 min^{-1} para cestas de maiores dimensões;
- 4º - Início e fim da lavagem. A primeira lavagem inicia-se durante a aceleração e a segunda, e em alguns casos a terceira lavagem, durante o ciclo, dependendo da qualidade da massa a centrifugar e açúcar a produzir - Centrifugação a alta velocidade conforme tempo especificado;
- 5º - Fase de desaceleração até que a velocidade definida para raspagem do açúcar e descarga seja atingida;
- 6º - Abertura da válvula na base da centrífuga e início da raspagem para descarga do açúcar.

O tempo do ciclo de centrifugação varia em função das características da centrífuga, da qualidade da massa produzida na etapa de cristalização e da qualidade do açúcar a produzir.

Em média, uma centrífuga efetua cerca de 18 a 25 ciclos por hora e descarrega cerca de 0,5 t de açúcar por ciclo, o que significa que uma refinaria de capacidade média, que produza 1000 t de açúcar por dia, terá que efetuar cerca de 2000 ciclos de centrifugação/dia.

A fase de lavagem é a operação que mais influência tem na qualidade do açúcar e nos custos energéticos associados à fase da recuperação do açúcar do xarope rejeitado.

O xarope rejeitado, Xarope de Refinação, contém os corantes e outros componentes que se pretendem separar no processo de refinação. Se a lavagem for insuficiente, o açúcar, para além de poder seguir para a fase seguinte - secagem classificação - com características que não estão de acordo com as especificações físico químicas definidas, terá problemas de “empedramento” na sua armazenagem, que é um dos motivos mais frequentes de reclamação.

Por outro lado, uma lavagem excessiva, irá dissolver açúcar, formando mais xaropes que terão de ser enviados para o setor de recuperação e posteriormente reprocessados, o que vai diminuir a capacidade global de produção.

2.4.1. Força centrífuga

A drenagem da xarope da massa cozida é feita pela força centrífuga, que depende da velocidade de rotação e do diâmetro da cesta. A força centrífuga é dependente da

velocidade de rotação e do diâmetro da cesta da centrífuga. É normalmente expressa em relação à gravidade pelo factor G, que é a razão entre a aceleração centrífuga e a aceleração devida à gravidade, ou seja:

$$G = \frac{\omega^2 \times r}{g} \quad \text{Equação 2.3}$$

em que:

- ω velocidade de rotação
- r raio do cesto da centrífuga
- g aceleração da gravidade

2.4.2. Teoria da separação sólido/líquido

Na centrifugação de uma mistura de cristais e xaropes de açúcar, normalmente designada por massa cozida, podem ser identificadas duas fases.

Inicialmente o líquido flui através do leito fixo dos cristais de açúcar, segundo a equação de Blake – Kozeny, que determina a velocidade u à qual o líquido flui através de um leito fixo.

$$u = \frac{\rho \times g \times d^2}{150 \times \mu} \times \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad \text{Equação 2.4}$$

A equação mostra que a velocidade é proporcional ao quadrado do diâmetro dos cristais (d^2) e inversamente proporcional à sua viscosidade μ . A aceleração da gravidade deve ser substituída pela aceleração da centrífuga, o que significa que o fluxo é directamente proporcional à aceleração centrífuga.

O líquido fluirá melhor se os cristais de açúcar forem maiores, mas de facto o termo $\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$ tem muito mais influência na velocidade. *Grimwood et al (2003)* referem que a porosidade ε da camada de açúcar é de cerca de 0,42. *Bruhns (2004)* refere que pode variar entre 0,35-0,50, em função da percentagem de cristais de pequena dimensão.

Aumentando ε de 0,4 para 0,5, $\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$ aumenta de 0,18 para 0,5 e reduzindo ε para 0,3, $\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$ é igual a 0,05, o que enfatiza o facto de uma porosidade mais elevada ser altamente favorável no processo de expulsão do xarope.

A porosidade é tanto maior quanto mais regular for o tamanho dos cristais (designado por CV - **C**oeficiente de **V**ariação mais baixo) e tanto menor quanto maior a dispersão do tamanho dos cristais (Coeficiente de Variação mais alto), o que significa que a qualidade da massa produzida na fase anterior (cristalização) tem uma grande influência no processo da separação dos cristais do xarope na fase subsequente de centrifugação.

Uma cristalização mal conduzida produz uma elevada quantidade de cristais muito pequenos, o que vai dificultar a expulsão do xarope e como tal aumentar a quantidade de água para lavagem do açúcar, dissolver mais açúcar e conseqüentemente gerar mais xaropes que terão que ser enviados para a etapa de recuperação para que o açúcar extraído seja posteriormente reprocessado.

A segunda fase da separação ocorre quando a expulsão do xarope está quase completa. O xarope é retido no leito dos cristais de açúcar pela tensão superficial e ação de capilaridade nos pontos em que os cristais se tocam entre si. Quanto maior a velocidade de rotação menor será a quantidade de líquido retido.

Segundo *Dombrowski e Brownell (1945)* a quantidade de líquido (neste caso xarope) que fica retido no leito do açúcar na centrífuga, a uma determinada força G , é determinada pelo número de capilaridade, o qual é diretamente proporcional à permeabilidade do leito e à força G e inversamente proporcional á tensão superficial. De acordo com estas relações, qualquer alteração numa destas variáveis terá um efeito direto no teor de humidade dos cristais de açúcar após centrifugação.

2.4.3. Eficiência da lavagem

A lavagem do açúcar na centrífuga envolve uma solução de compromisso entre a quantidade necessária de água para que o açúcar cumpra com as especificações de cor definidas e a não ocorrência de uma lavagem excessiva, com implicações na dissolução do açúcar.

Para uma maior eficiência deste processo, a água adicionada deve ser quente, habitualmente a temperaturas próximas dos 90°C, e distribuída homogeneamente ao longo de toda a altura da cesta da centrífuga – ver figura 2.4. Uma lavagem não uniforme vai ter como consequência o aparecimento em simultâneo de açúcar mal lavado ou excessivamente lavado em diferentes zonas da cesta.

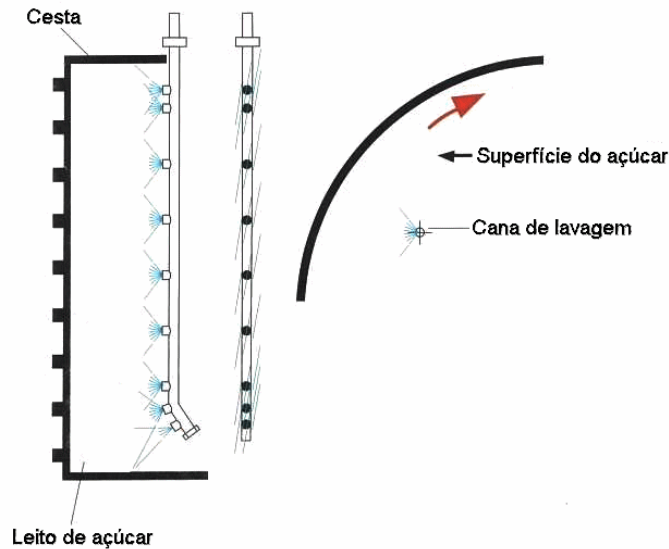


Figura 2.4. Desenho esquemático dos injectores de uma centrífuga
(reproduzido de Rein, 2007)

A quantidade de açúcar dissolvido pode ser determinada por comparação da pureza do xarope em açúcar na massa cozida, antes e após centrifugação.

Nas refinarias de açúcar, o indicador mais comum de quantidade de açúcar dissolvido é o rendimento em açúcar, que é calculado segundo a equação 2.5.

$$\eta \text{ da centrífuga} = \frac{\text{tonelada de massa alimentada à centrífuga}}{\text{tonelada de açúcar descarregado pela centrífuga}}$$

Equação 2.5

3 Descrição do trabalho realizado

No trabalho que a seguir se apresenta foi utilizado um colorímetro - o colorímetro ColourQ da Neltec - para medição da cor em linha do açúcar à saída das centrífugas, cujo limite de cor é 45 UI (Unidades ICUMSA).

Passa-se a descrever o modo de funcionamento do colorímetro, assim como as vantagens de utilização da informação fornecida pelo mesmo.

Como o colorímetro não faz a leitura direta em cor UI, descreve-se também a forma de calibração do equipamento e respetiva comparação com os resultados das análises de cor UI, determinados laboratorialmente.

Dão-se ainda alguns exemplos de situações reais ligadas a problemas existentes nas centrífugas/tachos de vácuo/cristalizadores, os quais não seriam detetados em tempo real caso não existisse a informação do perfil de cor ao longo da descarga das centrífugas.

3.1. O colorímetro

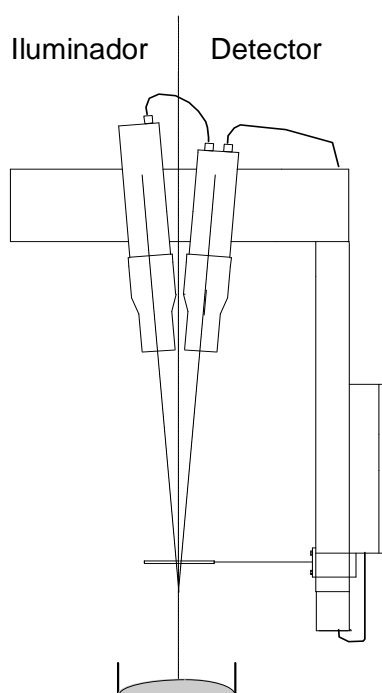


Figura 3.1. Esquema de funcionamento do Colorímetro
(Nielsen, 2009)

O princípio de funcionamento do colorímetro é simples: baseia-se na análise da luz refletida pelos cristais de açúcar.

O iluminador, figura 3.1., envia pulsos de luz para a superfície do açúcar; o detetor recebe a luz refletida sobre o açúcar em várias faixas do espetro luminoso, tendo o sistema de deteção a capacidade de eliminar a influência da luz ambiente sobre a medição efetuada.

A luz refletida pelos cristais de açúcar é rececionada e separada em vários comprimentos de onda no detetor, com vista a calcular a cor do açúcar em solução.

Para este cálculo é utilizado um modelo matemático não passível de apresentação uma vez que se trata de “*know how*” da empresa fornecedora do equipamento.

Na figura 3.2. apresenta-se uma fotografia do colorímetro e na figura 3.3. uma fotografia da sua instalação no transportador que recebe o açúcar á saída das centrífugas.



Figura 3.2. Colorímetro



Figura 3.3. Equipamento a medir a cor do açúcar num sistema de transporte

Calibração do colorímetro

O colorímetro é calibrado utilizando amostras recolhidas na linha de produção, ao mesmo tempo que o equipamento efetua as medidas sobre o açúcar e as armazena. As leituras efetuadas pelo colorímetro são correlacionadas com a cor ICUMSA determinada em laboratório, em amostras de açúcar recolhidas logo após o equipamento ter efetuado as leituras.

Após a curva de calibração ter sido construída, os resultados de cor são apresentados em unidades ICUMSA de cor em solução.

A exatidão do equipamento é posteriormente testada por comparação entre o valor de cor de amostras de cor conhecida, determinada em laboratório, e as leituras efetuadas pelo equipamento.

3.2. Informação fornecida pelo Colorímetro



Figura 3.4. Informação disponível no ecrã
(Nielsen, 2010)

A figura 3.4. mostra os resultados apresentados no visor do computador ligado ao equipamento, em dois tipos de gráficos. Na janela superior, o gráfico apresenta o perfil de

cor por descarga para cada centrífuga (W1 a W5) e na janela inferior o perfil de cores de todas as descargas ao longo de várias horas ou dias (conforme a configuração definida).

A linha contínua a preto, que acompanha os resultados de cor na parte inferior do visor, dá indicação das cores do açúcar nas cargas anteriores, o que permite perceber se, quando identificado um problema, este surgiu no momento ou já estava a acontecer em cargas anteriores. As linhas contínuas na parte de baixo da janela superior registam a altura do açúcar no transportador. O sistema está programado para que só sejam efetuadas leituras quando está a passar açúcar no transportador.

É possível ler no visor a informação da média de cor do açúcar produzido no turno que está a decorrer, 17,8 UI, bem como o valor médio de cor do açúcar produzido nos turnos anteriores, 18,9 e 19,5 UI.

Neste caso concreto, os resultados de cor apresentados permitem verificar a ocorrência de algum problema com a centrífuga W2, o qual não estava a acontecer na carga anterior, e que as restantes centrífugas estão a produzir açúcar com cor bastante inferior à especificação, o que, como já dito anteriormente, acarreta custos desnecessários. A lavagem excessiva vai dissolver açúcar, o que, para além de reduzir a quantidade de produto enviado para a fase seguinte da linha de produção, vai gerar xaropes que terão que ser novamente cristalizados, aumentando desta forma os consumos de água e vapor globais da refinação.

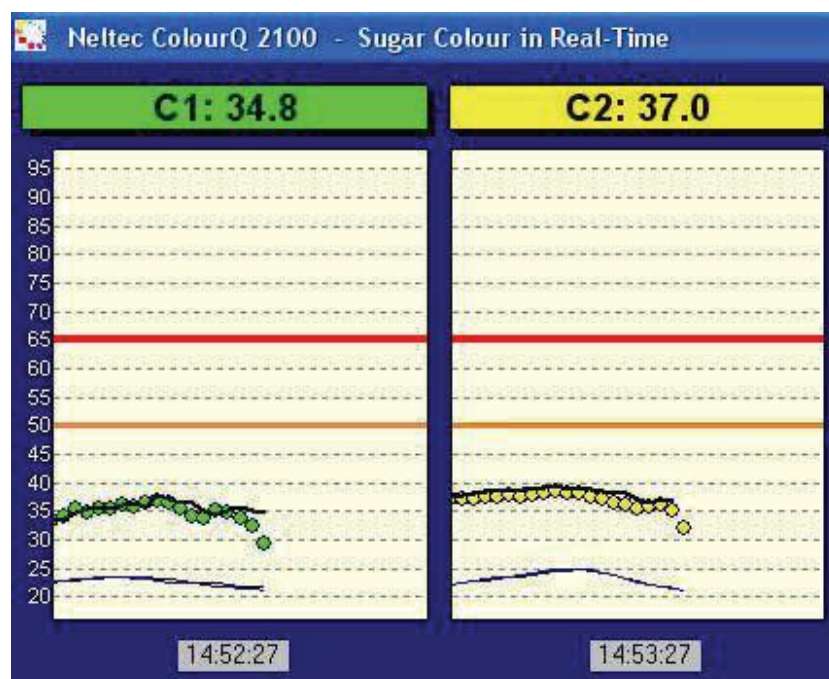


Figura 3.5. Problemas de funcionamento das centrífugas identificados pelo perfil de cor do açúcar durante a descarga das centrífugas (a)

(Nielsen, 2010)

Na figura 3.5. pode constatar-se que a curva do perfil de cor das duas centrífugas, para além de se encontrar abaixo do limite de cor (definido pelas linhas a laranja e vermelho) é muito plana, decaindo no final. A zona plana é um indicador de excesso de lavagem (veja-se o limite de cor definido pelas linhas a laranja e vermelho) e a queda da curva no final da lavagem é um indicador de lavagem ainda mais excessiva.

Este perfil de cor dá indicação de que no final da lavagem, os injetores ficaram a pingar, razão pela qual no final a cor era ainda mais baixa.

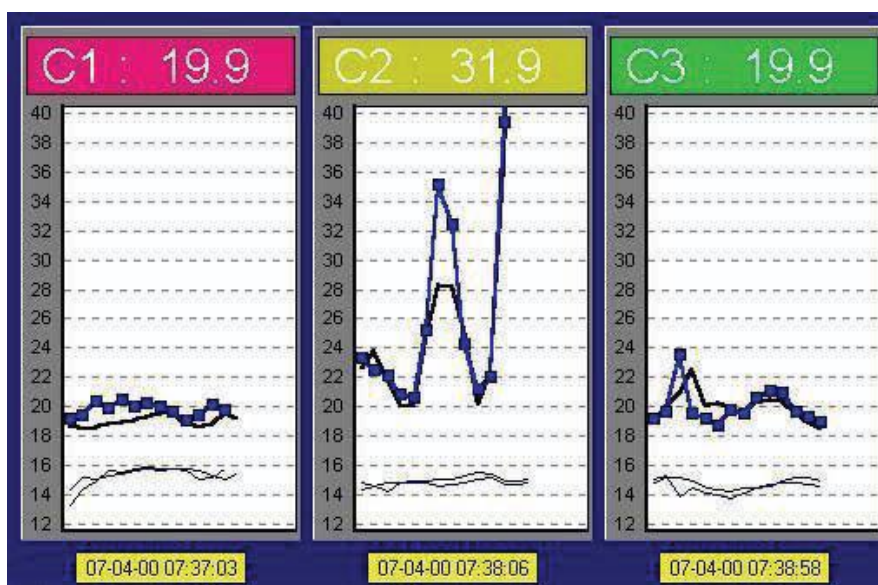


Figura 3.6. Problemas de funcionamento das centrífugas identificados pelo perfil de cor do açúcar durante a descarga das centrífugas (b)
(Nielsen, 2010)

A figura 3.6. mostra que a centrífuga C2 está a produzir açúcar com cor muito superior às centrífugas C1 e C3, estando este problema a ocorrer já na carga anterior (linha preta contínua tem o mesmo perfil de resultados de cor). O perfil de cor da centrífuga C2 dá indícios de que os injetores da água da centrífuga podem estar entupidos.

O colorímetro permite também parar o equipamento e/ou desviar o açúcar do circuito normal de produção, caso este se encontre fora do limite de cor especificado - valor de cor alarme - definido pelas linhas de cor laranja e vermelha.

A grande diferença entre os resultados fornecidos pelo laboratório e pelo colorímetro, é a capacidade de este último fornecer a informação em contínuo e em tempo real. Um segundo após o açúcar surgir no transportador, por baixo do local onde o equipamento se encontra instalado, é disponibilizada a informação de cor no visor, podendo posteriormente serem visualizadas mais de 1500 medições por hora.

Esta enorme quantidade de informação, para além de garantir que 100% do produto é controlado, permite identificar problemas no processo de fabrico. Por cada carga das centrífugas, o equipamento mostra o perfil de cor do açúcar centrifugado, desde o início até ao final da centrifugação, o que permite detetar se a centrífuga está ou não bem parametrizada/ajustada.

O perfil de cor pode-se apresentar sob a forma de uma curva quase plana, indicadora de lavagem excessiva, até uma curva com altos e baixos, indicadora de que a lavagem do açúcar não se está a processar de forma idêntica ao longo da centrífuga, ou seja, em alguns pontos o açúcar não está a ser lavado suficientemente e em outros está a ser lavado excessivamente.

O equipamento indica a cor média de cada carga, permitindo comparar facilmente o desempenho de cada uma das centrífugas logo que o açúcar começa a ser descarregado.

Através da análise do perfil de cor ao longo da descarga das centrífugas é possível identificar um cristalizador que esteja a produzir uma massa cozida com má qualidade e perceber as diferenças de trabalho entre os diversos Tachos de Vácuo. Se surgir um açúcar com uma cor fora da especificação pretendida, é possível identificar o problema de imediato e enviar esse açúcar para reprocessamento, evitando deste modo que o mesmo seja enviado para o silo e misturado com o açúcar com a qualidade pretendida, situação que não seria possível de impedir se fossem utilizados os resultados das análises do laboratório, dada a demora na obtenção dos mesmos.

No equipamento utilizado para levantamento dos dados que se apresentam neste trabalho, o colorímetro estava ligado ao controlo da quantidade de água de lavagem do açúcar nas centrífugas, de forma a que a quantidade da água de lavagem fosse ajustada em função da cor do açúcar descarregado.

4 Procedimento utilizado para o levantamento de dados

Tendo este trabalho como objetivo a determinação da redução do consumo energético de produção, com base no conhecimento, em contínuo e em tempo real, da cor do açúcar descarregado pelas centrífugas, e como o equipamento já estava instalado na linha de produção há alguns anos, o procedimento adotado foi o que de seguida se descreve:

1. Levantamento de dados para conhecimento do valor de cor UI do açúcar produzido, no período de tempo em que a cor não era controlada pelo colorímetro.

Recorrendo ao arquivo de análises de cor do açúcar existente no laboratório foi efetuado o levantamento de resultados de cor no período de tempo anterior à instalação do colorímetro.

2. Determinação do caudal de água fornecido pelos injetores das centrífugas.

A determinação do caudal dos injetores das centrífugas foi efetuada experimentalmente: volume versus tempo.

3. Determinação do tempo de água de lavagem necessário para atingir os diferentes valores de cor do açúcar.

A determinação foi efectuada em 30 ciclos de centrifugação e em diferentes cozeduras. Para minimizar a influência da eficiência da centrífuga, variação da qualidade da matéria prima e produto reprocessado, o levantamento de dados foi efetuado na mesma centrífuga e num só dia de produção.

4. Determinação dos tempos de lavagem do açúcar para cores na gama de 40 a 45 UI

5. Determinação da quantidade de xarope rejeitado e açúcar dissolvido no xarope para cada tempo de água de lavagem.

6. Cálculo do rendimento da centrífuga para cada tempo de água de lavagem/cor de açúcar descarregado.

7. Determinação do consumo de água, vapor e açúcar reprocessado para diferentes valores de rendimento das centrífugas.

Os consumos de água, vapor e açúcar reprocessado para diferentes valores de rendimento das centrífugas foram obtidos com base numa folha de cálculo desenvolvida

internamente pela refinaria que efetua o balanço mássico e energético para cada etapa da refinação, com uma base de cálculo de 10000 ton de rama de açúcar.

A título de exemplo apresenta-se na figura 4.1 um extrato do balanço global com o balanço mássico efetuado à etapa da centrifugação.

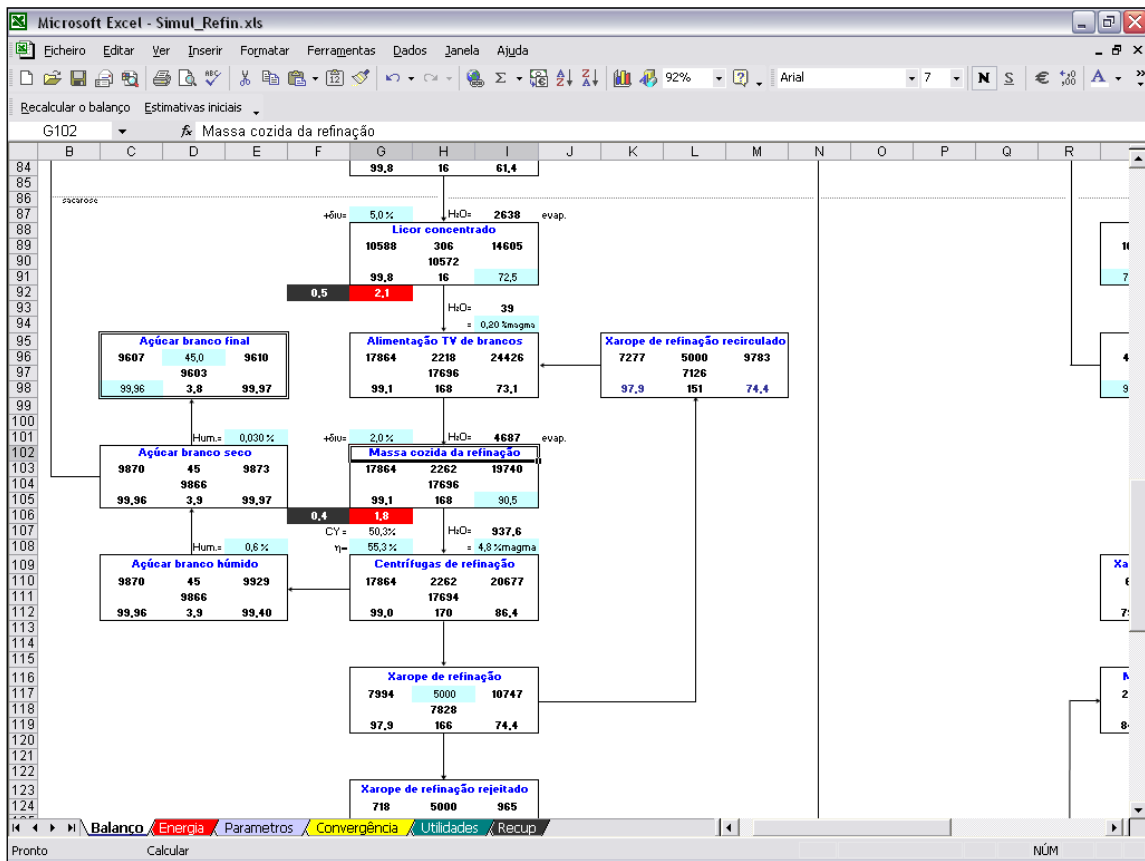


Figura 4.1. Exemplo de um balanço mássico à etapa de centrifugação (extrato do balanço global)

Legenda:

Etapa do Processo		
Matéria seca	Cor	Massa Total
	Sacarose	
Pureza	Impurezas	Brix

Unidades: ton

- Determinação da redução da capacidade de produção e reduções de consumos/custos de água e vapor por comparação com o açúcar produzido com cor de 45 UI.

9. Determinação dos custos de produção para os diferentes tempos de água de lavagem/cor de açúcar produzido.

10. Aumento dos custos de água e vapor para uma capacidade de refinação de 300000 ton/ano de rama de açúcar.

11. Redução de custos e aumento de capacidade de produção por redução de 1 segundo no tempo de lavagem nas centrífugas.

5 Resultados obtidos

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos em relação a cada um dos pontos acima considerados.

5.1. Levantamento de dados relativos a valores médios de cor - histórico

Após a análise dos resultados de cor do açúcar à saída das centrífugas, no período em que a cor não era controlada pelo colorímetro, verificou-se que, embora o limite máximo de cor possível fosse 45 UI, os valores médios de cor variavam entre 40 e 43 UI.

Deste modo determinaram-se os tempos de água de lavagem do açúcar para obtenção de açúcar de 40, 41, 42, 43, 44 e 45 UI de cor para várias cozeduras (ver ponto 5.4. - Tempos de lavagem do açúcar para diferentes cores UI).

5.2. Resultados relativos a caudal de água dos injetores

A determinação do caudal dos injetores foi determinada experimentalmente. O resultado médio das várias determinações efetuadas foi 72,5 L/min.

5.3. Resultados relativos a tempos de água de lavagem para diferentes valores de cor

Apresenta-se de seguida o gráfico 5.1., o qual correlaciona o tempo de água de lavagem do açúcar com as diferentes cores de açúcar branco produzido.

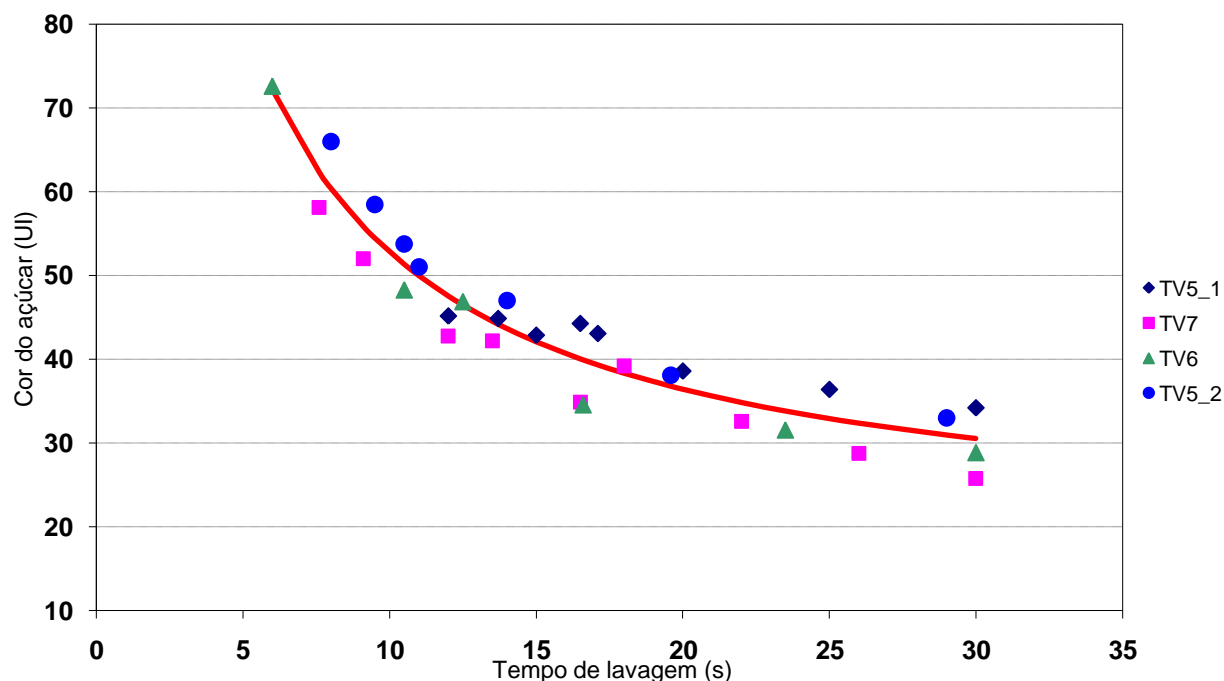


Figura 5.1. Tempo de água de lavagem para diferentes valores de cor UI

Pela análise do gráfico pode-se verificar que quanto menor for o valor de cor do açúcar produzido maior é a quantidade de água necessária para reduzir uma unidade de cor.

5.4. Tempos de lavagem do açúcar para diferentes cores UI

Na tabela 5.1., encontram-se os resultados dos tempos necessários de água de lavagem do açúcar para obter cores de 45, 44, 43, 42, 41 e 40 UI.

Tabela 5.1. Tempo de água de lavagem para diferentes valores de cor UI do açúcar

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Tempo de lavagem (s)	13,2	13,8	14,4	15,0	15,8	16,5
Volume de água/ciclo da cent. (L)	16,00	16,68	17,41	18,19	19,05	19,99

O acréscimo do tempo de água de lavagem para se produzir açúcar com cores mais baixas não é constante por unidade de cor. Com 44 UI são necessários mais 0,6 s de lavagem, quando comparado com o tempo necessário para a cor de 45UI. No entanto, para produzir açúcar com 40UI, são necessários mais 0,7 s de lavagem, quando comparado com o tempo necessário para 41 UI.

Para cores de 43 e 40 UI (valores habituais de cor do açúcar quando o controlo não era feito pelo colorímetro em linha) são necessários mais 1,2 e 3,3 s de tempo de água de lavagem, quando comparado com o tempo necessário para a cor de 45UI.

5.5. Xarope rejeitado e açúcar dissolvido no xarope para cada tempo de água de lavagem

(ver anexo A)

Tabela 5.2. Açúcar dissolvido no xarope para cada tempo de água de lavagem

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Vol. de água/ciclo da centrífuga (L)	13,25	13,80	14,40	15,06	15,77	16,54
Açúcar dissolvido/ciclo (kg)	55,45	57,78	60,30	63,03	66,00	69,24

Pelos resultados apresentados na tabela 5.2., a quantidade de açúcar dissolvido, como esperado, também não é constante por unidade de cor abaixo do limite admissível. Com 44 UI são dissolvidos mais 2,33 kg de açúcar, quando comparado com o açúcar dissolvido com cor de 45UI; no entanto, para produzir açúcar com 40 UI são dissolvidos mais 3,24 kg de açúcar, quando comparado com o açúcar dissolvido com cor de 41 UI.

Este facto é devido não só à quantidade de água por unidade de cor não ser constante, mas também porque aumentando o tempo de lavagem, maior quantidade de xarope á volta do cristal de açúcar é removido e consequentemente o cristal de açúcar fica mais acessível para que ocorra a sua dissolução.

5.6. Rendimento (η) da centrifugação para cada tempo de água de lavagem/cor de açúcar descarregado

(ver anexo A)

Tabela 5.3. Rendimento da centrifugação

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Açúcar dissolvido/ciclo (kg)	55,45	57,78	60,30	63,03	66,00	69,24

Açúcar produzido/ciclo (kg)	470,62	468,29	465,77	463,04	460,07	456,83
η da centrifugação (%)	50,20	49,95	49,68	49,39	49,07	48,73

Na tabela 5.3, apresentam-se os resultados dos rendimentos da centrifugação em função da cor do açúcar produzido, em que o rendimento é calculado segundo:

$$\eta \text{ da centrífuga} = \frac{\text{ton de massa alimentada à centrífuga}}{\text{ton de açúcar descarregado pela centrífuga}}$$

O rendimento sobe para valores de cor de açúcar mais alto, o que vai influenciar a quantidade de açúcar produzido por ciclo, ou seja, a capacidade de produção. O valor de rendimento da centrifugação mais elevado é atingido para o valor de cor de 45 UI.

5.7. Consumos globais de água e vapor e açúcar reprocessado para os diferentes rendimentos das centrífugas

(ver anexo A)

Tabela 5.4. Açúcar reprocessado, consumos de água e vapor globais da refinação para os diferentes rendimentos das centrífugas

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Açúcar reprocessado (ton)	1202,9	1253,5	1308,2	1367,4	1431,8	1502,1
Consumo de vapor (ton)	9145,5	9169,6	9197,8	9228,0	9261,9	9294,4
Consumo de água (ton)	8127,3	8149,9	8177,5	8206,0	8238,9	8270,4

Base de calculo: 10000 ton rama de açúcar /20339 ton de massa alimentada à centrífuga

A tabela 5.4. apresenta os resultados dos consumos globais de água e vapor da refinação em função da cor final do açúcar produzido, para uma base de cálculo de 10000 ton de rama de açúcar processada.

Os aumentos de consumos de água e vapor, assim como de diminuição da capacidade de produção, por comparação com as quantidades necessárias de vapor e água e capacidade de produção quando se produz açúcar com cor de 45UI, estão apresentados na tabela 5.5.

Pela leitura destas tabelas, verifica-se que, quando se produz açúcar com 43 UI de cor são necessárias mais 52,3 ton de vapor e 50,2 ton de água e perde-se 1,1 % da capacidade de

produção. Quando o açúcar produzido tem 40 UI de cor, o consumo de vapor e água aumenta 148,9 ton e 143,1 ton, respetivamente, e perde-se 3% da capacidade de produção.

5.8. Capacidade de produção e consumos de água e vapor por comparação com os consumos para açúcar com 45 UI

(ver anexo A)

Tabela 5.5. Redução da capacidade de produção e aumento dos consumos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Diminuição da capacidade (%)	-	0,5	1,1	1,7	2,3	3,0
Aumento do consumo de água (ton)	-	22,6	50,2	78,7	111,6	143,1
Aumento do consumo de vapor (ton)	-	24,1	52,3	82,5	116,4	148,9

Base de cálculo: 10000 ton rama de açúcar / 20339 ton de massa alimentada à centrífuga

5.9. Custos de produção para os diferentes cores de açúcar produzido

(ver anexo A)

Tabela 5.6. Aumento dos custos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Aumento do custo de água (€)	-	64	134	209	291	380
Aumento do custo de vapor (€)	-	643	1337	2090	2908	3801

Base de cálculo: 10000 ton rama de açúcar / 20339 ton de massa alimentada à centrífuga

Custo de água: 3,3 € / t

Custo de vapor: 30 € / t

Os custos de produção ao nível de água e vapor estão representados na tabela 5.6., com uma base de custo de 3,3 € / ton de água e 30 € / ton de vapor (valores de custo no momento do estudo). Os custos de água têm tendência para subir e os de vapor variam com muita frequência, o que significa que estes resultados devem ser sempre avaliados em função dos custos atualizados.

Pela comparação dos custos de vapor e água quando se produz açúcar de 45 UI de cor versus 43 UI e 40 UI, verifica-se que ao produzir açúcar com 43 UI de cor o custo de vapor sobe 1337 € e o de água 134 € e quando o açúcar produzido tem 40 UI de cor, o custo de vapor sobe 3801 € e o de água 380 €.

5.10. Aumento dos custos de água e vapor para uma capacidade de 300000 t/ano de rama de açúcar

(ver anexo A)

Tabela 5.7. Aumento dos custos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI para uma capacidade de 300000 t/ano de rama de açúcar

	Cor (UI)					
	45	44	43	42	41	40
Aumento do custo de água (€)	-	2237	4970	7791	11048	14167
Aumento do custo de vapor (€)	-	21690	47070	74250	104760	134010
Aumento de custos totais (€) (água + vapor)	-	23927	52040	82041	115808	148177

Custo de água: 3,3 €/t

Custo de vapor: 30 €/t

A tabela 5.7. apresenta os resultados de acréscimos de custos anuais, ao nível de custos de água e vapor, para uma refinaria que processe 300000 ton de rama de açúcar por ano.

Comparando com os custos de produção de açúcar com 45 UI de cor, o acréscimo de custo é de 52040 € e 148177 € por ano para açúcar produzido com cor de 43 UI e 40 UI, respetivamente.

5.11. Redução de custos e aumento de capacidade de produção por redução de 1 segundo no tempo de lavagem nas centrífugas

(ver anexo A)

Tabela 5.8. Redução de consumo de água e vapor e aumento de capacidade por redução de 1 s no tempo da água de lavagem

Redução do volume de água (L/ciclo)	1,2
Sacarose não dissolvida (kg/ciclo)	4,2
Redução do consumo de água (ton)	26
Sacarose não dissolvida (ton)	91
Aumento de capacidade (ton)	0,9
Consumo de vapor (ton)	9185
Consumo de água (ton)	8165
Redução do consumo de vapor (ton)	39,4
Redução do consumo de vapor (ton)	38,0
Poupança no consumo de vapor (%)	0,43
Poupança no consumo de água (%)	0,47
Redução de custos de água e vapor (€/ano)	39222

Para capacidade de 300000 ton/ano de rama de açúcar

Custo de água: 3,3 € / t

Custo de vapor: 30 € / t

Os resultados da tabela 5.8 apresentam os valores de consumos de água e vapor, aumento de capacidade de produção e redução de custos de água e vapor, tendo por base a redução de 1 s de água na lavagem do açúcar nas centrífugas. Embora estes valores possam variar em função da gama de cor em que se opera, permitem perceber o impacto da importância que tem o consumo de água na centrífuga nos custos de produção.

Uma refinaria de capacidade média, que refine 300000 ton de rama de açúcar por ano e que trabalhe com um limite de cor do açúcar de 45 UI, ao reduzir 1 s de água na lavagem das centrífugas está a economizar 39222 € por ano (para 30 € /ton de vapor e 3,3 € /ton de água).

6 Discussão dos Resultados

A quantidade de água necessária para reduzir a cor UI do açúcar é função da gama de cor de trabalho, da qualidade da massa cozida fornecida às centrífugas e do tipo de processo de produção. O gráfico cor versus tempo de água de lavagem das centrífugas (figura 5.1. - *Tempo de água de lavagem para diferentes valores de cor*) mostra que, para uma mesma qualidade de massa de açúcar, para obter uma redução de 5UI na cor na gama de 45-40 UI, é necessário aumentar 3,3 segundos na água de lavagem. No entanto, se a gama de trabalho for de 40-35UI, o tempo de lavagem sobe de 16,5 para 21,8 s.

A qualidade da massa alimentada à centrífuga depende da qualidade da matéria prima, rama de açúcar e do açúcar produzido. Os resultados apresentados devem ser interpretados tendo como referência a qualidade da rama de açúcar processada (2600 UI de cor e 98,70 %Z de pureza), o processo de refinação descrito e um açúcar com 45 UI de cor limite. Ou seja, cada fábrica deve fazer um balanço semelhante ao aqui descrito para determinação dos benefícios económicos por trabalhar nos valores limite de cor.

No caso apresentado, para uma fábrica com a capacidade de processamento de 300000 ton de rama de açúcar e com um custo de 3,3 € / ton água e 30 € / ton de vapor, os benefícios económicos de trabalhar com 45 UI de cor em comparação com 40 a 44 UI, variam entre 23927 e 148177 € (ver tabela 5.7. - *Aumento dos custos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI para uma capacidade de 300000 t/ano de rama de açúcar*).

A redução de um só segundo de água pode economizar 39222 € (ver tabela 5.8. - *Redução de consumo de água e vapor e aumento de capacidade por redução de 1 s no tempo da água de lavagem*).

Os custos energéticos da refinação variam em função da capacidade de produção, qualidade da matéria prima processada e processo e equipamento utilizados. Na refinaria onde foi efectuado este estudo representa 75% dos custos globais da refinação, pelo que os valores de economia apresentados têm um impacto significativo nos custos finais de produção do açúcar.

A capacidade de produção aumenta entre 0,5% (cor 44 UI) e 3% (cor 40 UI), o que também tem um impacto nos custos, uma vez que os custos fixos têm também grandes repercussões nos custos globais de produção.

Os benefícios económicos referidos são aqueles que é possível calcular por levantamento de dados das características dos produtos e parâmetros do processo.

No entanto, a análise do perfil de cor do açúcar ao longo da descarga de cada centrífuga permite detetar problemas logo após a sua ocorrência e atuar de imediato no sentido da sua correção.

Como se pode ver na na figura 3.4. - *Informação disponível no ecrã*, os resultados de perfil de cor da centrífuga W2 permitiram identificar um problema na centrífuga e atuar de imediato no sentido da correção do mesmo.

Na figura 3.5.- *Problemas de funcionamento das centrifugas identificados pelo perfil de cor do açúcar*, durante a descarga da centrifuga C1, verifica-se que a parte plana da curva de cor é um indicador de excesso de lavagem e a queda no final, de lavagem ainda mais excessiva. Em média, 4 segundos a mais de tempo de lavagem das centrifugas corresponde a um consumo acrescido de 5 L de água, a qual vai dissolver cerca de 16 kg de açúcar por cada ciclo de centrifugação, o qual, para além de não seguir para a fase seguinte da linha de produção, vai consumir energia e água no setor da recuperação e posterior reprocessamento.

Situações como:

- Injetores da água de lavagem entupidos;
- Redes das centrifugas mal lavadas,
- Raspagem insuficiente do açúcar da rede;
- Problemas de granulometria do açúcar (problemas com origem na etapa anterior – cristalização);
- Lavagem excessiva do açúcar,

podem ser facilmente identificados, quer pela comparação do perfil de cor do açúcar descarregado nas várias centrífugas, quer por comparação com o perfil de cor da carga anterior na mesma centrífuga.

7 Conclusões

A medição de cor em linha apresenta enormes benefícios quando comparada com os resultados de cor obtidos em laboratório. Estes benefícios manifestam-se ao nível de vários parâmetros que se passam a destacar:

- Controlo em tempo real e a 100% da cor do açúcar produzido, por comparação com os resultados de cor fornecidos pelo laboratório que só são conhecidos muito tempo depois da recolha da amostras/obtenção do resultado das análises, conduzindo a que açúcar fora da especificação se misture com açúcar com a qualidade desejada ou seja até fornecido ao cliente.
- A informação do perfil da cor do açúcar ao longo da descarga da centrífuga deteta imediatamente todos os problemas nas centrífugas, assim como problemas com o açúcar produzido na etapa da cristalização.
- O açúcar que eventualmente possa estar fora dos limites de cor aceitáveis definidos pode ser imediatamente desviado e reprocessado, evitando a sua mistura com açúcar com a qualidade requerida e consumo adicional de água, energia e auxiliares tecnológicos para o seu posterior reprocessamento.
- A margem de segurança na cor do açúcar produzido pode ser significativamente reduzida, garantindo ao mesmo tempo uma cor conforme com a especificação pretendida.
- A redução da margem de segurança ao mínimo possível, permite a redução de custos de produção e aumenta a sustentabilidade do sistema, pois trabalhar com uma alta margem de segurança, não só tem custos elevados como implica uma capacidade de produção superior, maior consumo de água e energia e utilização de uma quantidade superior de auxiliares tecnológicos.

Tendo o custo de energia um grande impacto nos custos finais de produção, todos os aspetos acima referidos permitem economizar água, energia e auxiliares tecnológicos, assim como dar resposta à permanente procura das melhores tecnologias disponíveis para a criação de processos de produção mais sustentáveis.

Dependendo os benefícios económicos das características da matéria prima processada, do processo/equipamento de produção, das características especificadas para o açúcar e dos custos de água e energia, entre outros, cada fábrica deverá efetuar um levantamento de

dados semelhante ao apresentado para determinação dos respetivos benefícios económicos.

8 Perspetivas de trabalhos futuros

A rama de açúcar é um produto natural, variando muito em qualidade de acordo com o país de origem e ano agrícola.

O processo de refinação apresenta dois objetivos essenciais, a saber: a) **Higienização**, para obtenção de um produto final de qualidade alimentar, pois a rama de açúcar é transportada a granel em barcos desde o país onde é carregada; b) **Descoloração**, pois a grande percentagem de produção das refinarias é de açúcar branco.

A rama de açúcar é composta por um cristal de sacarose envolvido por uma camada de xarope que contém a maior parte dos corantes que se pretendem ver removidos, sendo a cor a característica com mais variação na rama de açúcar.

A fase inicial consiste na remoção da camada exterior de xarope, através da mistura da rama de açúcar com um xarope quente, extraído das ramas anteriormente processadas, de modo a que na etapa seguinte, a centrifugação, se remova não só o xarope adicionado como o envolvente do cristal.

Atendendo a que a quantidade de xarope existente à volta da rama de açúcar varia com a sua cor, as centrífugas funcionam com valores de operação diferentes, os quais são ajustados por tipo de rama de forma a obter a maior percentagem de descoloração e ao mesmo tempo evitar o arrastamento do açúcar do cristal para o xarope que se vai rejeitar.

Para que o processo da centrifugação seja o mais eficiente possível, é procedimento habitual fazer um teste de descoloração em laboratório. Através da mistura de rama com uma solução saturada de açúcar e posterior centrifugação, é possível determinar a descoloração obtida sem que haja dissolução do cristal de sacarose interior.

A quantidade de água de lavagem na centrífuga, assim como o tempo de rotação são ajustados de forma a obter o mesmo valor de descoloração que se obteve em laboratório. Este procedimento é feito por cada barco de rama rececionada, o qual pode conter entre 5000 a 25000 ton de rama.

Durante a refinação da quantidade total da rama de um barco a qualidade varia e não é viável estar a fazer permanentemente o teste em laboratório para ajuste das centrífugas. Sabe-se no entanto que, trabalhando sempre com os mesmos parâmetros, poder-se-á estar a remover sacarose ou a não remover suficientemente o xarope. Toda a sacarose arrastada pelo xarope, para além de reduzir a capacidade de produção de açúcar final, terá que ser enviada para um processo de recuperação - extração de açúcar - o qual vai dar origem a uma massa de açúcar que será reprocessada e a melaço, que contém ainda entre 35 a 45 % de açúcar.

O processo de recuperação consome muita água e energia sob a forma de vapor, devendo a quantidade de produtos enviadas para esta etapa ser a menor possível.

A informação da cor da rama centrifugada em linha, permitiria um ajuste automático dos parâmetros de operação, de forma a obter a rama lavada com a mesma cor da testada em laboratório, otimizando desta forma os consumos de água e vapor, não só nesta etapa, como no processo de refinação global, em virtude da menor quantidade de xaropes a serem enviados para reprocessamento.

Após a etapa de carbonatação o licor é descolorado, sendo muito comum a utilização de resinas de permuta iónica. O tempo de passagem do licor pelo leito das resinas é determinado pela cor do licor à entrada das colunas que contêm as resinas.

Cada coluna contém resinas com diferentes tempos de utilização (nº de ciclos) e, conseqüentemente, com diferentes capacidades de descoloração. A definição de um mesmo tempo de residência para todas as colunas está longe do procedimento correto de operação.

A informação em contínuo da cor do licor à saída da coluna das resinas, permitiria controlar o tempo do ciclo de descoloração em função da cor do licor, otimizando o funcionamento desta etapa.

Na etapa de recuperação, conforme já descrito anteriormente, a massa cozida é centrifugada, obtendo-se um açúcar, designado por açúcar de recuperação. Este açúcar é dissolvido e misturado com o licor da afinação, sendo a sua cor muito relevante, pois vai contribuir para a cor global do licor que vai ser refinado.

O modo de operação da centrífuga para obtenção deste açúcar é determinante para a cor obtida, a qual pode variar entre 2500 e 5000 UI. É prática comum os operadores adicionarem muita água nesta etapa com o objetivo de reduzirem a cor do açúcar de recuperação obtido. Água em excesso vai gerar mais xaropes que terão que ser novamente processados, aumentando os consumos de água e vapor.

O controlo da cor deste açúcar, dentro de limites pré-definidos, permitiria não só a otimização do trabalho da centrífuga, reduzindo os consumos de água e vapor do processo global, como a deteção de problemas do funcionamento da mesma, tão comuns devido às características das massas a centrifugar, nomeadamente a viscosidade.

Para trabalho futuro sugere-se pois a instalação do equipamento nas linhas de controlo de cor da rama de açúcar à saída das centrífugas, no licor à saída das resinas e no açúcar recuperado e respetivo levantamento de dados, por métodos muito semelhantes aos

utilizados neste trabalho, para determinação dos consumos/custos de água e vapor em função dos diferentes modos de operação, de forma a calcular a redução potencial dos custos globais de produção.

Referências bibliográficas

Bienaimé, L. and Nielsen, BC (1999). White sugar colour in solution, Comparison of Laboratory and In-Line Methods. *Proc. C.I.T.S. Conference*, Antwerp, Belgium.

Buchholz K, and Bruhns M (1995). The 1994/95 campaign in Germany and new technological developments.

Buchholz, K and Puke, H (1995). *Report of the investigation of the NELTEC-instrument for measurement of white sugar colour in solution at the Nordstemmen factory of Union-Zucker Südhannover GmbH.*

Chung, Chi Chou (2000). *Handbook of Sugar Refining – A Manual for the Design and Operation of Sugar Refining Facilities*, John Wiley & Sons, Inc, New York.

Cuel, J (1984). Le Malaxage Continu sous Vide de la Raffinerie de Nantes. Une Économie d'Énergie en Cristallisation, *Ind. Aliment. Agric.*, 101, 591-597.

Ditl, P, Beránek, L and Rieger, F (1990) Simulation of a Stirred Sugar Boiling Pan, *Zuckerind.*, 115, 8, 667-676.

Kadlec, P and Bubník, Z (1993). Use of Mathematical Models for Calculation of Physical Properties of Sugar Solutions for On-Line Control of Processes in Sugar Industry, *3rd Conf. European Federation of Food Science and Technology*, Porto, 26-29 September.

King, S, and Marron, M (2009). Experience and utilisation of an on-line sugar colorimeter in a raw sugar mill. *Proc Aust Soc Cane Technol* 31: pp. 521-530.

Lyle, O (1970) *Technology for Sugar Refinery Workers*. Chapman & Hall Ltd., 3rd Ed., London.

Malgoyre, R, Nielsen, BC, and Verhaeghe, F, (1999). Centrifugal Washing Optimisation by Real-Time Colour Measurement. *Proc. Sugar Ind. Tech. Inc. Conf.*

Nielsen, B C (2004). Real-time Solution Colour of Crystalline Sugar. *Proc. Conf. Sugar Proc. Res. Inst. Conf.*, pp 283-294.

Nielsen, BC (2003). On-line Continuous Measurement of Colour in Sugar Factories. *Comptes Rendus AvH Association; 10th Symposium*, Reims, France, 30-35.

Nielsen, BC (2005). Process Optimization by Real Time Measurement of Crystal Sugar Colour. *18th Asoc Tec Azuc de Mex Conf.*

Nielsen, BC (2006). Centrifugal control with automatic colour measurement. *Proc S Afr Sug Technol Ass 80, (CD-ROM) 417-426.*

Nielsen, BC (2007). Cost Reductions in Colour Removal by Real-time Colour Measurement. *20th Asoc Tec Azuc de Mex Conf.*

Nielsen, BC (2008). Better process control and large savings. *Proc Sug Process Res Inst Conf.*

Nielsen, BC (2008). Indirect real-time colour measurement. *Proc Sug Process Res Inst Conf.*

Nielsen, BC (2009). Increase Sugar House Throughput by Measurement and Automation. *Proc Am Soc Beet Technol 35, (CD-ROM).*

Nielsen, BC (2009). Measure Sugar Colour in Real-time to control the Sugar House and save Costs. *Comptes Rendus AvH Association; 16th Symposium, Reims, France, 55-62.*

Nielsen, BC (1996). In-line colour measurement of sugar in ICUMSA units. *Proc. Sugar Proc. Res. Inst. Workshop on Separation Processes.*

Nielsen, BC, Blanco, RS, and Clarke, MA (1998). On-line Color Measurement of Raw and Washed Raw Cane Sugars. *Proc. Conf. Sugar Proc. Res.*

Rein, P (2007). *Cane Sugar Engineering.* Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Germany

The Determination of White Sugar Solution Colour - Official, ICUMSA. Method GS2/3-9 (1994).

Van der Poel, PW, Schiweck, H, Schwartz, T (1998). *Sugar Technology.*

ANEXOS

Anexo A – Cálculos

A.1. Correlação, Cor UI versus tempo de água de lavagem do açúcar

Resultados experimentais de cor do açúcar em função do tempo de lavagem de lavagem na centrífuga.

Tabela A.1. Variação do tempo de lavagem com a cor final do açúcar

TV6		TV5_1		TV5_2		TV7	
tempo (s)	Cor (UI)	tempo (s)	Cor (UI)	tempo (s)	Cor (UI)	tempo (s)	Cor (UI)
7,6	58,1	12,0	45,2	8,0	66,0	6,0	72,6
9,1	52,0	13,7	44,9	9,5	58,5	10,5	48,3
12,0	42,8	15,0	42,9	10,5	53,8	12,5	46,9
13,5	42,2	16,5	44,3	11,0	51,0	16,6	34,6
16,5	34,9	17,1	43,1	14,0	47,0	23,5	31,6
18,0	39,2	20,0	38,6	19,6	38,1	30,0	28,9
22,0	32,6	25,0	36,4	29,0	33,0	-	-
26,0	28,8	30,0	34,2	-	-	-	-
30,0	25,8	-	-	-	-	-	-

Correlação obtida:

$$Cor_{UI} = \frac{A + B \times t}{1 + C \times t}$$

em que:

Cor_{UI} = Cor em Unidades ICUMSA

t = tempo de lavagem (s)

A = 346

B = 15,3

C = 0,845

De seguida apresenta-se um exemplo de cálculo para cada um dos resultados apresentados para produção de açúcar com cor de 40 UI

A.1. Determinação do tempo de água de lavagem

$$t_{lavagem} = \frac{(346 - \text{CorUI})}{(-15,3 + 0,845 \times \text{CorUI})}$$

$$t_{lavagem} = \frac{(346 - 40)}{(-15,3 + 0,845 \times 40)}$$

$$t_{lavagem} = 16,5 \text{ s}$$

A.2. Determinação do volume de água de lavagem/ciclo

$$\text{Volume de água de lavagem/ciclo} = Q \times t = \frac{(72,5 \times 16,5)}{60} = 19,99 \text{ L}$$

em que:

$$t = t_{lavagem} = 16,5 \text{ s}$$

$$Q = \text{Caudal dos injectores} = 72,5 \text{ L/min} \rightarrow \text{determinação experimental}$$

A.3. Brix de saturação (Brix_{sat}) do xarope rejeitado

$$\text{Brix}_{sat} = 64,398 + 7,25 \times 10^{-2}T + 2,0569 \times 10^{-3}T^2 - 9,035 \times 10^{-6}T^3 \quad \text{Equação A1}$$

em que:

$$T \text{ do xarope rejeitado} = 75^\circ\text{C} \rightarrow \text{determinação experimental}$$

$$\text{Brix}_{sat}(T=75^\circ\text{C}) = 64,398 + 7,25 \times 10^{-2} \times 75 + 2,0569 \times 10^{-3} \times 75^2 - 9,035 \times 10^{-6} \times 75^3$$

$$\text{Brix}_{sat} = 77,6 \text{ Brix}$$

A.4. Sacarose dissolvida/ciclo: mS

Exemplo de cálculo para $\text{Cor}_{UI} = 40\text{UI}$

$$\text{Brix} = \frac{\text{mS}}{\text{mS} + \text{mH}_2\text{O}} \times 100$$

$$mS = \frac{mH_2O_{cor40UI} \times Brix_{sat40UI}}{100 - Brix_{sat40UI}}$$

em que:

$$Brix = Brix_{sat} = 77,6 \text{ Brix}$$

$$mH_2O_{cor40UI} = \text{volume de água de lavagem/ciclo} = 19,99 \text{ kg}$$

$$mS = \frac{19,99 \times 77,6}{100 - 77,6}$$

$$mS = 69,24 \text{ kg}$$

A.5. Rendimento da centrífuga

Capacidade teórica da centrífuga = 1250 kg/ciclo

Capacidade real utilizada: 75% da capacidade total → *determinação experimental*

Capacidade real utilizada = $\frac{1250 \times 75}{100} = 937,5 \text{ kg/ciclo}$ = massa(açúcar+xarope) alimentada à centrífuga

Para cor = 45UI, rendimento da centrífuga (η) = 50,2 % → *determinação experimental*

em que:

$$\eta \text{ da centrífuga} = \frac{\text{massa (açúcar + xarope) alimentada à centrífuga}}{\text{açúcar descarregado pela centrífuga / ciclo}}$$

$$\text{Açúcar descarregado / ciclo}_{cor 45 UI} = \frac{937,5 \times 50,2}{100} = 470,625 \text{ kg}$$

Açúcar a mais dissolvido por se trabalhar a 40 UI: Açúcar descarregado_{cor 45UI} - (Açúcar dissolvido_{cor 40UI} - Açúcar dissolvido_{cor 45UI})

em que:

Açúcar dissolvido_{cor 45UI} é calculado da mesma forma que Açúcar dissolvido_{cor 40UI} = 55,45 kg

$$\text{Açúcar descarregado/ciclo}_{cor 40UI} = 470,625 - (69,24 - 55,45) = 456,83 \text{ kg}$$

$$\eta_{cor 40UI} = \frac{456,83}{937,5} \times 100 = 48,73\%$$

A.6. Açúcar reprocessado, consumos de água e vapor globais da refinação para os diferentes rendimentos das centrífugas

Ex: $C_{UI} = 40UI$

Nº de ciclos de centrifugação para 10000 ton de rama:

- pelo balanço mássico e térmico da refinaria, no processamento de 10000 ton de rama produzem-se 20339 ton (açúcar + xarope) que vão alimentar as centrífugas.

tonelada/ciclo = 0,9375 ton → *calculado em A5*

$$n^{\circ} \text{ ciclos de centrifugação} = \frac{20339}{0,9375} = 21695 \text{ ciclos}$$

Quantidade de açúcar reprocessado para açúcar de cor = 40 UI:

$$\text{Açúcar reprocessado a } 40 \text{ UI /ciclo} \times n^{\circ} \text{ ciclos} = 69,24 \times 21695 = 1502 \text{ ton}$$

em que:

$$\text{Açúcar reprocessado a } 40 \text{ UI/ciclo} = \text{Açúcar dissolvido}_{\text{cor } 40\text{UI}} \rightarrow \textit{calculado em A5}$$

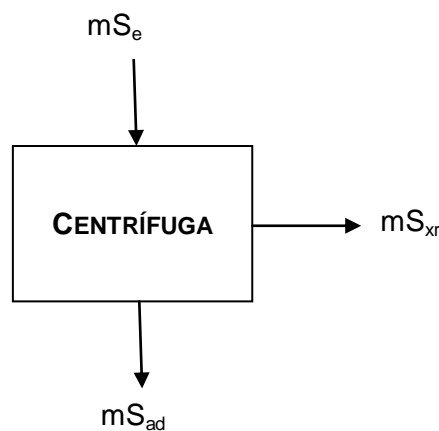
A.7. Balanço mássico

Exemplo do balanço mássico efectuado à etapa da centrifugação:

Presupostos do balanço:

- 10000 ton de rama de açúcar processada e produção de açúcar com 45UI de cor.

A.7.1. Balanço à sacarose



Entradas:

Massa total entrada nas centrífugas (m_e) = 20339 ton

Brix da massa entrada nas centrífugas ($Brix_e$) = 90,5 Brix

Pureza da massa entrada nas centrífugas (P_e) = 98,3%

Massa de sacarose entrada nas centrífugas: mS_e :

$$mS_e = m_e \times \frac{Brix_e}{100} \times \frac{P_e}{100}$$

$$mS_e = 20339 \times \frac{90,5}{100} \times \frac{98,3}{100} = 18094 \text{ ton}$$

Saídas:

Pressuposto: para simplificação dos cálculos considerou-se que as perdas nesta etapa do processo são desprezáveis

Rendimento do processo (η_p) em açúcar (matéria seca) para produção de açúcar com cor de 45 UI: 55%.

Massa de açúcar descarregado pela centrífuga (matéria seca): mA_{ms}

$$mA_{ms} = m_e \times \frac{Brix_e}{100} \times \frac{\eta_p}{100}$$

$$mA_{ms} = 20339 \times \frac{90,5}{100} \times \frac{55}{100} = 10123 \text{ ton}$$

Pureza do açúcar à saída da centrífuga (P_a) = 99,97% → *resultado de análise laboratorial*

Massa de sacarose no açúcar descarregado: mS_{ad}

$$mS_{ad} = mA_{ms} \times P_a$$

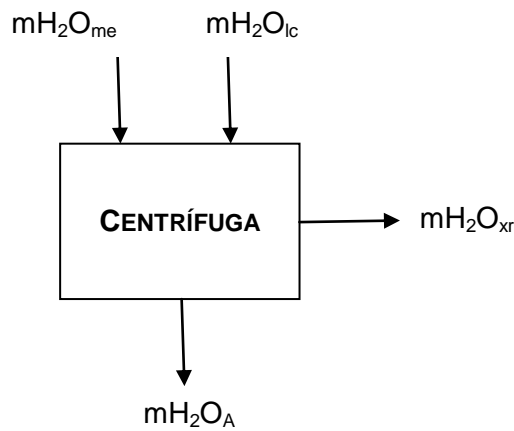
$$mS_{ad} = 10123 \times \frac{99,97}{100} = 10120 \text{ ton}$$

Massa de sacarose no xarope rejeitado pelas centrífugas: mS_{xr}

$$mS_{xr} = mS_e - mS_{ad}$$

$$mS_{xr} = 18094 - 10120 = 7974 \text{ ton}$$

A.7.2. Balanço à água



Entradas:

Massa de água na massa entrada na centrífuga: mH_2O_{me}

$$mH_2O_{me} = m_e - m_e \times \frac{\text{Brix}_e}{100}$$

$$mH_2O_{me} = 20339 - 20339 \times \frac{90,5}{100} = 1932 \text{ ton}$$

Massa da água de lavagem na centrífuga mH_2O_{lc} → *calculada no ponto de balanço à água.*

Saídas:

Brix do xarope rejeitado (Brix_{xr}) = 73,9 Brix → *resultado de análise*

Pureza do xarope rejeitado (P_{xr}) = 96,2 % → *resultado de análise*

Massa de xarope rejeitado na centrífuga: m_{xr}

$$m_{XR} = \frac{mS_{xr}}{\frac{\text{Brix}_{xr}}{100} \times \frac{P_{xr}}{100}}$$

$$m_{XR} = \frac{7974}{\frac{73,9}{100} \times \frac{96,2}{100}} = 11217 \text{ t}$$

Massa de água no xarope rejeitado pela centrífuga: mH_2O_{xr}

$$mH_2O_{xr} = m_{XR} - mS_{xr}$$

$$mH_2O_{xr} = 11217 - 7974 = 3243 \text{ ton}$$

Humidade do açúcar à saída da centrífuga (hum_A): 0,6% → *resultado de análise laboratorial*

Massa de água no açúcar: mH_2O_A

$$mH_2O_A = mA_{ms} \times \frac{\text{hum}_A}{100}$$

$$mH_2O_A = 10123 \times \frac{0,6}{100} = 61 \text{ ton}$$

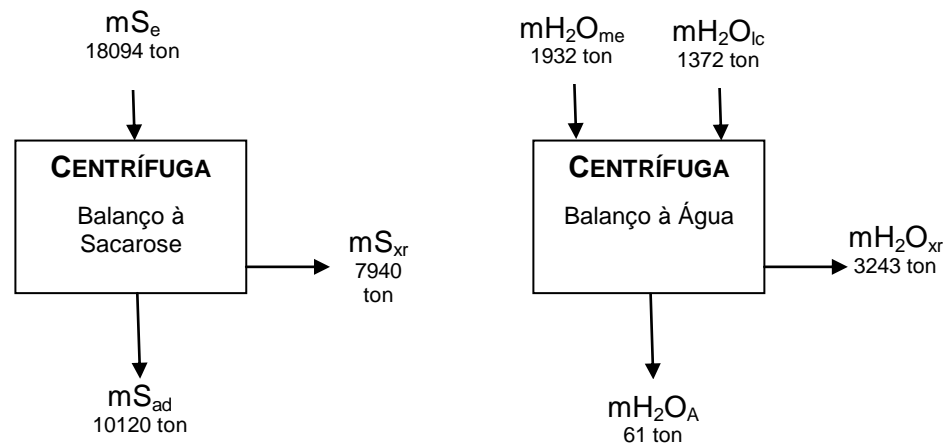
Entradas:

Massa da água de lavagem na centrífuga: mH_2O_{lc}

$$mH_2O_{lc} = mH_2O_A + mH_2O_{xr} - mH_2O_{me}$$

$$mH_2O_{lc} = 61 + 3243 - 1932 = 1372 \text{ ton}$$

Balanço mássico à centrifugação:



A.8. Balanço Energético:

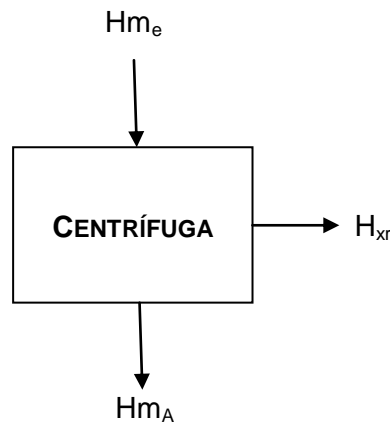
Os valores globais de consumo de água e vapor foram obtidos através da introdução de dados de diferentes rendimentos da centrífuga e cor do açúcar final numa folha de cálculo interna da refinaria. O modelo de cálculo faz o balanço global de cor, massa e de energia de todo processo de refinação, permitindo obter os valores de consumo de água e vapor para os diferentes valores de cor do açúcar produzido.

Como exemplo apresenta-se o balanço à entalpia na etapa da refinação.

No cálculo apresentado as perdas de calor e calor de diluição foram desprezadas.

Presupostos do balanço:

- 10000 ton de rama de açúcar processada e produção de açúcar com 45 UI de cor.



A.8.1. Entradas: Entalpia da massa alimentada á centrífuga (H_{m_e})

$$H = m \times c_p \times \Delta T$$

Equação A.2.

$$H_{m_e} = H_{m \text{ etapa anterior}} + m_{H_2O_{lc}} \times c_{pH_2O_{lc}} \times \Delta T_{H_2O_{lc}} \square$$

$$H_{m \text{ etapa anterior}} = 2740066 \text{ MJ}$$

$$c_{pH_2O_{lc}} = c_{pH_2O} = 4,18 \text{ MJ}/(\text{ton} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$m_{H_2O_{lc}} = 1372 \text{ t} \rightarrow \text{calculado em A.7.2}$$

$$\Delta T_{H_2O_{lc}} = (85 - 0)^\circ\text{C} = 85^\circ\text{C} \rightarrow \text{dado experimental (Referência=0}^\circ\text{C)}$$

$$H_{m_e} = 2740066 + 1372 \times 4,18 \times 85 = 3227538 \text{ MJ}$$

A.8.2. Saídas: Entalpia do xarope rejeitado (H_{xr})
Entalpia do Açúcar produzido (H_{m_A})

$$H_{xr} = m_{xr} \times \bar{c}_{p_{xr}} \times \Delta T_{xr}$$

em que:

$$m_{xr} = 11217 \rightarrow \text{calculado em A.7.2}$$

$$\Delta T_{xr} = (68 - 0)^\circ\text{C} = 68^\circ\text{C} \rightarrow \text{dado experimental (Referência=0}^\circ\text{C)}$$

$$\bar{c}_{p_{xr}} = 4186,8 - 29,7 \times \text{Brix}_{xr} + 4,61 \times \text{Brix}_{xr} \times \text{Pur}_{xr} - 0,075 \times \text{Brix}_{xr} \times \bar{T}_{xr}$$

Equação A.3

em que:

$$\text{Brix}_{xr} = 73,9$$

$$P_{xr} = 96,2\%$$

$$\bar{T}_{xr} = \frac{0+68}{2} = 34,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{c}p_{xr} = \frac{4186,8}{1000} - \frac{29,7}{1000} \times 73,9 + \frac{4,61}{1000} \times 73,9 \times \frac{96,2}{100} + \frac{0,075}{1000} \times 73,9 \times 34,0$$

$$\bar{c}p_{xr} = 2,51 \text{ MJ}/(\text{ton} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$H_{xr} = 11217 \times 2,51 \times 68 = 1914518 \text{ MJ}$$

Açúcar:

$$H_{mA} = mA \times c_{p_{mA}} \times \Delta T_{mA}$$

em que:

$$mA = mA_{mS} + mH_2O_A$$

$$mA = 10123 + 61 = 10184 \text{ ton}$$

$$c_{p_{mA}} = \frac{m_{mA} \times c_{p_A} + mH_2O_A \times c_{p_{H_2O}}}{mA_{mS} + mH_2O_A}$$

$$\bar{c}p_A = 1155,6 + 3,768 \times \bar{T}_A$$

Equação A.4

$$\bar{T}_{mA} = \frac{0+60}{2} = 30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{c}p_A = \frac{1155,6}{1000} + \frac{3,768}{1000} \times 30 = 1,27 \text{ MJ}/(\text{ton} \cdot ^\circ\text{C})$$

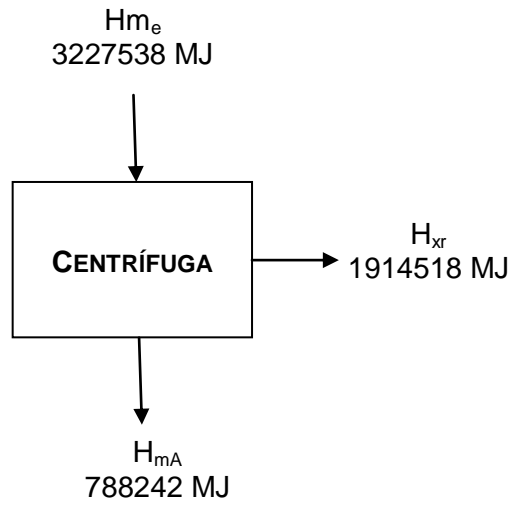
$$c_{p_{H_2O}} = 4,18 \text{ MJ}/(\text{ton} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$mH_2O_A = 61 \text{ ton} \rightarrow \text{calculado em A.7.2}$$

$$c_{p_{mA}} = \frac{10123 \times 1,27 + 61 \times 4,18}{10184} = 1,29 \text{ MJ}/(\text{ton} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$H_{mA} = 10184 \times 1,29 \times 60 = 788242 \text{ MJ}$$

Balanço energético à centrifugação:



A diferença entre a entalpia à entrada e saída é devida a perdas de calor inerentes ao processo de centrifugação.

A.8.Redução da capacidade de produção e o aumento dos consumos de água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI

A.8.1. Redução da capacidade de produção

Açúcar reprocessado cor_{45 UI}: 1202,9 ton

Açúcar reprocessado cor_{40 UI}: 1502,1 ton

Redução da quantidade de açúcar reprocessado por se produzir açúcar com 45 UI de cor:

Açúcar reprocessado cor_{40UI} – Açúcar reprocessado cor_{45UI} =

1202,9 – 1502,1 = 299,3 ton

Rendimento da refinaria = 98,35% → *dado do balanço para a qualidade da rama considerada*

$$\text{Redução na capacidade} = \frac{299,3}{10000 \times 0,9835} \times 100 = 3,0\%$$

A.8.2. Aumento do consumo de água

Consumo de água cor_{40UI} = 8270,4 ton → *dado do balanço global*

Consumo de água cor_{45UI} = 8127,3 ton → *dado do balanço global*

Consumo de água cor_{40UI} – Consumo de água cor_{45UI} = 8270,4 – 8127,3 = 143,1 ton

A.8.3. Aumento do consumo de vapor

Consumo de vapor cor_{40 UI} = 9294,4 ton → *dado do balanço global*

Consumo de vapor cor_{45 UI} = 9145,5 ton → *dado do balanço global*

Consumo de vapor cor_{40 UI} – Consumo de vapor cor_{45 UI} = 9294,4 – 9145,5 = 148,9 ton

A.9. Aumento dos custos água e vapor por comparação com açúcar produzido com 45 UI

Custo da água : 3,3 € / ton

Custo do vapor: 30,0 € / ton

Exemplo : $C_{UI} = 40UI$

Aumento do custo de água $cor_{40 UI} = 143,1 \times 3,3 = 380 \text{ €}$

Aumento do custo de vapor $cor_{40 UI} = 148,9 \times 30,0 = 3801 \text{ €}$

A.10. Aumento dos custos água e vapor por comparação com o açúcar produzido com 45 UI para uma capacidade de 300000 t/ano de refinação

Aumento do custo de água $cor_{40 UI} = 143,1 \times 3,3 \times 30 = 14167 \text{ €}$

Aumento do custo de vapor $cor_{40 UI} = 148,9 \times 30,0 \times 30 = 134010 \text{ €}$

Anexo B – Determinação da cor ICUMSA em solução - Açúcar Branco Method GS2/3-9, (1994). The Determination of White Sugar Solution Colour - Official, ICUMSA.

EQUIPAMENTO E MATERIAIS UTILIZADOS

Equipamento

- Espectrofotómetro;
- Refractómetro;
- Balança;
- Agitador e barra magnética;
- Bomba de vácuo;

Materiais

- Células ópticas Utilizar células com comprimento 10 cm
- Filtro
- Membrana com diâmetro 47 mm e porosidade de 0,45 μm ;
- Funil equipado com ajuste magnético;

MODO DE PROCEDER

Preparação da amostra

- Homogeneizar a amostra de açúcar;
- Pesar aproximadamente 50 g da amostra e igual quantidade de água destilada para um copo de 250 ml;
- Dissolver a solução, fazendo uso do agitador magnético, à temperatura ambiente;
- Filtrar a solução de amostra por vácuo para um kitasato, usando o filtro referido em 2.2;

Medição da cor

Absorvância

- Selecionar o comprimento de onda de 420 nm no espectrofotómetro;
- Fazer o zero da cor com água destilada usando uma célula de 10 cm de percurso óptico (no caso de um espectrofotómetro de feixe duplo, esta célula permanece durante a medição);
- Lavar a célula com a solução de açúcar;
- Encher a célula com a solução;
- Determinar a absorvância da solução filtrada assegurando que a solução está perfeitamente homogénea, as células estão bem limpas e o compartimento onde se

coloca a célula devidamente fechado;

Brix

- Determinar a concentração, em *Brix*, da solução contida na célula, por leitura no refractómetro;

RESULTADOS

- Calcular a concentração de sólidos na solução de amostra (*c*), através da medição do Brix;
- Calcular a cor ICUMSA aplicando a equação que se segue:

$$\text{Cor ICUMSA} = \frac{1000 \times \text{Abs}}{b \times c} \text{ UI}$$

em que:

Abs absorvância registada

b comprimento da célula, em cm.

c concentração da solução teste, em g/mL, obtida a partir da expressão:

$$c = \frac{\text{Brix} \times \rho}{10^5} \text{ g/mL}$$

A massa específica da solução teste, ρ , obtém-se a partir da seguinte tabela.

Brix	Massa específica (Kg/m ³)
47	1213,3
48	1218,7
49	1224,2
50	1229,7
51	1235,2
52	1240,7
53	1246,3