



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE PESQUISA EM FLUIDODINÂMICA E
IMAGEM**

LUCAS AYSLAN DE LIMA PEREIRA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS
EFEITOS DA USINA CUCAÚ**

CAMPINA GRANDE – PB

2022

LUCAS AYSLAN DE LIMA PEREIRA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS
EFEITOS DA USINA CUCAÚ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Campina Grande,
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química

ORIENTADOR: Prof. Dr. Severino Rodrigues de
Farias Neto

CAMPINA GRANDE-PB

2022

P436e Pereira, Lucas Ayslan de Lima.
Estudo da eficiência energética dos evaporadores de múltiplos efeitos da Usina Cucaú / Lucas Ayslan de Lima Pereira. – Campina Grande, 2022.
48 f. : il. color.

Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.
"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".
Referências.

1. Cana-de-açúcar. 2. Produção. 3. Balanço Energico. 4.. Evaporadores. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Título.

CDU 633.61:664.11(043)

AGRADECIMENTOS

A Deus, Ser onipotente, onisciente e onipresente, pela presença constante em minha vida, por todas as graças e bênçãos recebidas ao longo de todos os anos da minha existência.

Agradeço aos meus pais, Francisca de Lima Silva Pereira e Antônio Pereira com imensa admiração, amor e gratidão pela oportunidade da vida.

Agradeço a minha avó Selma, por todo apoio, amor e carinho.

Aos meus familiares, que sempre me transmitiram carinho e incentivo.

Agradeço a minha companheira Raynara Altino, por todo amor, carinho, respeito, por aguentar meu estresse nesse processo final do curso e me apoiar em todos os momentos.

Ao meu orientador, Severino Rodrigues de Farias Neto, pelos seus ensinamentos, compreensão e confiança. O qual contribuiu de maneira decisiva na minha formação e que me transmitiu muito mais do que ensinamentos, meu eterno sentimento de admiração, respeito e gratidão.

Ao meu amigo irmão Vinicius Medeiros (Vinicinho), dividimos por 5 anos o mesmo teto, muito obrigado por todos os conselhos, por ter aguentado meu mau humor.

Meu agradecimento também aos demais professores pela formação recebida, o meu eterno sentimento de gratidão a todos.

A minha segunda família, Paulo Filho, Jonathan, João Batista, João Vitor, Gustavo, Lucas Lucena, Lucas Barbosa e tantos outros que chamais serão esquecidos, muito obrigado por tudo.

Às amigas que conquistei ao longo dessa jornada, Pablo, Elaine, Monilly e tantos outros que me ajudaram de maneira relevante a trilhar o meu caminho.

A todos que se fizeram presentes diretos ou indiretamente, nesta minha jornada.

Lazy people do a little work and think they should be winning. Winners work as hard as possible and still worry that they're being lazy.

Lewis Caralla

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo e o Brasil o maior produtor atualmente. Todo o açúcar do país ou grande parte dele é produzido por meio da cana de açúcar e uma das etapas de produção é a evaporação do caldo. Essa etapa tem grande importância no balanço energético das usinas produtoras de açúcar, pois ao mesmo tempo em que necessita de grande quantidade de vapor das caldeiras, também gera muito vapor vegetal de baixa pressão. Os evaporadores usados nesse processo são do tipo múltiplo efeito e sua eficiência pode ser observada usando cálculos teóricos com base em parâmetros operacionais. Com isso, o objetivo desse trabalho é analisar a eficiência de um sistema de evaporação de múltiplos efeitos operantes em uma unidade sucroenergética. A metodologia da pesquisa foi estudar um conjunto de evaporadores da Usina Cucaú, no Pernambuco e para isso foram coletadas 7 amostras durante o mês de janeiro e comparado com os resultados do início da safra por meio de cálculos baseados em parâmetros operacionais. Com os resultados, foi observado que as análises laboratoriais do mês de janeiro foram equivalentes a análise feita no início da safra dando uma evidência de que a evaporação está adequada.

Palavras-Chave: Cana-de-açúcar. Produção. Balanço Energético. Evaporadores.

ABSTRACT

Sugarcane is one of the main crops in the world and Brazil is currently the largest producer. All or a large part of the country's sugar is produced using sugar cane and one of the production stages is the evaporation of the juice. This step is important in the energy balance of sugar mills, because at the same time it requires a large amount of steam from the boilers, it also generates a lot of low-pressure vegetable steam. Used evaporates used as multiple and efficient effects can be observed using the theoretical processes based on operational parameters. With that, the objective of this work is to analyze the efficiency of an evaporation system of several operational effects in a unit of energy. The research methodology was to study a set of evaporators from Usina Cucaú for that were collected in Pernambuco during the month of January and compared with the results of the beginning of the harvest through a set of evaporators in practical parameters. With the results, it was observed that the laboratory tests of the month of January were equivalent to the analysis made at the beginning of the harvest, giving proof that adequate evaporation.

Keywords: Sugar cane. Production. Energetic Balance. Evaporators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As regiões de domínio da cultura da cana-de-açúcar no Brasil	122
Figura 2 - Evaporador de tubos horizontais.....	16
Figura 3 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra.....	188
Figura 4 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo cesto	19
Figura 5 - Evaporador com circulação forçada com elemento externo vertical	200
Figura 6 - Evaporador com circulação forçada com elemento externo horizontal. .	211
Figura 7 - Evaporador de tubos verticais longos ou de películas ascendentes	222
Figura 8 - Evaporador de película ascendente-descendente	233
Figura 9 - Evaporador a película turbulenta	244
Figura 10 - Esquema de um evaporador de placas.....	255
Figura 11 - Esquema de um evaporador com quatro efeitos.....	255
Figura 12 – Planta de Evaporação da Usina Cucaú.....	33
Figura 13 – Esquema de um evaporador triplo efeito.....	33
Figura 14 – Caixa 1A e 2B	34
Figura 15 – Caixa 1B.....	35
Figura 16 – Caixa 2B.....	35
Figura 17 – Caixa 3.	36
Figura 18 – Caixa 4.	36
Figura 19 – Caixa 5	37
Figura 20 – Ponto de coleta do xarope.....	33
Figura 21 - Refratômetro.	39
Figura 22 - Representa o Brix do caldo durante o processo de evaporação.....	42
Figura 23 - Representa a comparação do Brix do caldo com a taxa de evaporação específica.	43
Figura 24 - Representa a comparação do Brix do início da safra com as análises coletadas.....	44
Figura 25 - Representa a comparação do Brix do início da safra com as análises coletadas corrigidas... ..	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição centesimal média dos constituintes minerais da cana-de-açúcar sadia e madura.	13
Tabela 2 - Composição centesimal média dos constituintes orgânicos de uma cana-de-açúcar sadia e madura.	14
Tabela 3 - Mostra o comportamento do Brix do xarope nas análises realizadas.	45

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

M	Quantidade de calor transmitida ao caldo, em kcal
S	Superfície de aquecimento do aquecedor, em m ²
P _c	Peso de caldo a ser aquecido, em kg/hora
C	Calor específico do caldo (cerca de 0,9)
T	Temperatura do vapor aquecedor, em °C
t ₀	Temperatura inicial das caldeiras, em °C
t _{cf}	Temperatura do caldo frio, em °C
T _{vs}	Temperatura do vapor servido, em °C
t	Temperatura de saída do caldo quente, em °C
k	Coeficiente de transmissão do aquecedor, em kcal/m ² /°C/hora
U	Velocidade do caldo nos tubos, em metros/segundos
E	Quantidade de água evaporada, em ton/h
v	Volume do caldo, em ton/h
V _f	Consumo de vapor no ultimo efeito, em kg/h
Brix	Concentração dos sólidos solúveis em solução, %
B _m	Brix médio
B ₁	Brix do primeiro efeito
B ₂	Brix do segundo efeito
B ₃	Brix do terceiro efeito
B ₄	Brix do quarto efeito
B ₅	Brix do quinto efeito
S ₁	consumo de vapor no 1º efeito, em kg/h
S ₂	consumo de vapor no 2º efeito, em kg/h
S ₃	consumo de vapor no 3º efeito, em kg/h
S ₄	consumo de vapor no 4º efeito, em kg/h
S ₅	consumo de vapor no 5º efeito, em kg/h
TEE	Taxa de evaporação específica, em kg/h
f	eficiência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
	2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
	3.1 Cana-de-açúcar	12
	3.1.1 Composição da cana-de-açúcar	13
	3.1.2 Obtenção do açúcar	14
	3.2 Evaporação	15
	3.2.1 Tipos de Evaporadores	15
	3.2.2 Evaporadores de Circulação Natural	16
	3.2.2.1 Evaporadores de tubos verticais tipo calandra, padrão ou Roberts 17	
	3.2.2.2 Evaporadores de tubos verticais tipo cesto	18
	3.2.3 Evaporadores de Circulação Forçada	19
	3.2.4 Evaporadores de Película	21
	3.2.4.1 Evaporador de película ascendente	21
	3.2.4.2 Evaporador de película ascendente-descendente	22
	3.2.4.3 Evaporador a película turbulenta	23
	3.2.4.4 Evaporadores de placas.....	24
	3.3 Evaporação em conjunto ou múltiplo efeito.....	25
	3.4 Principais problemas com a evaporação	26
	3.4.1 Perdas de sacarose por arraste	27
	3.4.2 Perdas por inversão	27
	3.4.3 Brix do xarope baixo	27
	3.5 Fatores que influenciam no múltiplo efeito	29

	3.5.1 Pressão de vapor de escape baixo	29
	3.5.2 Vácuo baixo	29
	3.5.3 Pressão diferencial incorreta.....	30
	3.5.4 Incrustações.....	31
	3.5.4.1 Efeitos da formação de incrustações	32
4	METODOLOGIA	33
	4.1 Evaporadores: parâmetros operacionais e cálculos teóricos	34
	4.2 Análises de laboratório.....	36
	4.3 CONSUMO DE VAPOR	37
	4.3.1 CÁLCULO DAS TEMPERATURAS DOS AQUECEDORES	38
	4.3.2 CÁLCULOS DO CONSUMO DE VAPOR	38
	4.3.3 BRUX E BRUX MÉDIO	39
	4.3.4 TAXA DE EVAPORAÇÃO ESPECÍFICA.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6	CONCLUSÃO	46

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, cultivada em mais de 100 países, e representa uma importante fonte de mão de obra no meio rural nesses países (NOVACANA, 2021).

O Brasil, dentre outros países, é o maior produtor de cana-de-açúcar atualmente. A estimativa da safra 2020/2021 de cana-de-açúcar no Brasil indica produção de 642,1 milhões de toneladas do vegetal (CROPLIFE, 2021).

O estado de São Paulo continua sendo o maior estado produtor, correspondendo a 55% da produção do país. O estado de Goiás é o segundo na lista de um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, seguido por Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (CROPLIFE, 2021).

No Brasil todo o açúcar ou a maioria dele é produzido por meio da cana de açúcar. Uma das etapas dessa produção em uma usina produtora de açúcar é a evaporação do caldo. Um projeto de evaporação tem como objetivo retirar a água presente no caldo clarificado a fim de que o caldo se concentre até a formação de xarope (BORTOLOTTI, 2016).

A etapa de evaporação tem grande importância no balanço energético das usinas produtoras de açúcar, pois ao mesmo tempo em que necessita de grande quantidade de vapor das caldeiras, também gera muito vapor vegetal de baixa pressão, utilizado por outros equipamentos existentes na usina (JESUS, 2004).

Evaporadores são equipamentos de troca térmica empregados em pequena ou larga escala no meio industrial e possuem a função de concentrar soluções diluídas conforme a necessidade do processo. São encontrados de diferentes formas e tamanhos, compostos por materiais específicos, apresentam diferentes arranjos relacionados ao seu aquecimento e podem ser classificados de acordo com o seu arranjo, como evaporadores de simples ou de múltiplos efeitos (CAMPESE; PASSINI, 2015).

Os evaporadores utilizados para obtenção do xarope na indústria açucareira são do tipo múltiplo efeito, onde se usa o vapor saturado para fornecer calor ao primeiro efeito, com isso o mesmo efeito serve como fonte de calor para o efeito seguinte e assim sucessivamente (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

A obtenção do Brix 65, concentração dos sólidos solúveis em solução, depende de diversos fatores como parâmetros operacionais bem definidos, cuidados com limpeza para evitar incrustações e cuidados operacionais. Se tudo estiver funcionando

de forma adequada, existe uma excelente probabilidade de que o xarope obtido esteja no valor ideal para se produzir o açúcar (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

A eficiência de um evaporador pode ser observada, utilizando cálculos teóricos a partir de dados dos quais são tidos como parâmetros operacionais, tais como: temperatura de vapor servido, volume do caldo, temperatura do caldo de entrada e saída e entre outros. Após a realização dos cálculos teóricos podem-se comprovar a eficiência da evaporação através de análises rotineiras em laboratório, podendo assim fazer comparações dos resultados teóricos com os práticos (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar a eficiência de um sistema de evaporação de múltiplos efeitos operantes em uma unidade sucroenergética.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a capacidade do sistema de evaporadores;
- Comparar os resultados obtidos da modelagem com os dados disponibilizados pela Usina Cucaú.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cana-de-açúcar

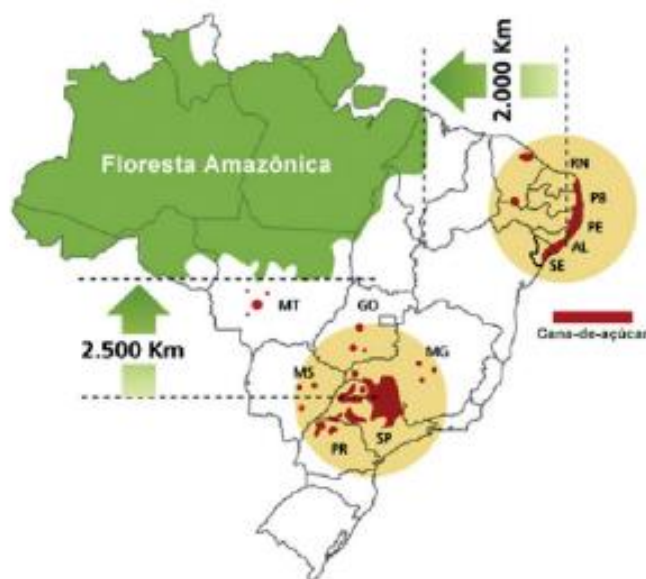
A cana-de-açúcar é uma gramínea pertencente ao gênero *saccharum*, utilizada como principal matéria-prima na fabricação de açúcar. Seu plantio é feito desde a antiguidade. Embora as variações pertençam à espécie *officinarum*, existem quatro espécies adicionais: *S. berberie*; *S. sinense*; *S. spontaneum* e *S. robustum* (CALDAS, 2012; CREMA, 2012).

É uma planta alógama, proveniente do Sudeste Asiático, na região da Nova Guiné e leste da Indonésia. Considerada uma planta semi-perene de grande porte, formadora de rizomas e touceiras, que apresenta ciclo médio de quatro anos, desde o plantio até a renovação das áreas plantadas (SANTOS, 2012).

A cana é uma acumuladora de carbono, hidrogênio, oxigênio, energia solar, clorofila e forças radioativas, por meio de suas folhas e de toda riqueza orgânica e mineral que está presente no solo e por meio de suas raízes. A cana-de-açúcar é uma fábrica de carboidrato. Ela é uma das perfeições do reino vegetal, e o açúcar é o alimento mais puro e energético da natureza, pois, não é nada mais nada menos do que a “luz solar cristalizada” (CASTRO; ANDRADE, 2007).

No Brasil tem-se as regiões Nordeste, Sudeste, Sul e Centro Oeste como maiores cultivadores de cana-de-açúcar. A Figura 1 apresenta as regiões de domínio da cultura da cana-de-açúcar (CASTRO; ANDRADE, 2007).

Figura 1 - As regiões de domínio da cultura da cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: Favero (2011)

3.1.1 Composição da cana-de-açúcar

A cana de açúcar compõe-se de fibra e caldo. Pode-se considerar que em um colmo (caule sem as folhas da cana) normal de cana madura contenha cerca de 12,5% de fibra e 87,5% de caldo. No colmo tem-se 25% de partes duras, representadas pelos nós e cascas, e 75 % das partes moles constituídas pelas as partes internas dos meritalos (CASTRO; ANDRADE, 2007).

É importante entender que os nós e as cascas (partes duras da cana) contêm menos caldo, o que compreende cerca de 20% do total retirado do colmo. Por outro lado, as partes moles no colmo da cana-de-açúcar apresentam 80% do caldo total armazenado. Isso é muito importante para a indústria açucareira, pois visa a obtenção de maior quantidade de caldo, com isso, quanto mais grosso for o colmo e quanto mais espaçado forem os nós melhor o rendimento industrial (CASTRO; ANDRADE, 2007).

O caldo que é retirado da cana, é a matéria prima da indústria açucareira, e tem composição variável. Parte desta composição do caldo extraído de uma cana sadia pode ser visto nas Tabela 1 e Tabela 2 exibem a composição média dos constituintes minerais e orgânicos presentes na cana (CASTRO; ANDRADE, 2007).

Tabela 1 - Composição centesimal média dos constituintes minerais da cana-de-açúcar sadia e madura.

SUBSTÂNCIAS	%
Água	74,50
SiO ₂	0,25
K ₂ O ₂	0,12
Na ₂ O	0,01
CaO	0,02
MgO	0,01
Cinzas	0,5
Fe ₂ O ₃	Vestígios
P ₂ O ₅	0,07
SO ₃	0,2
Cl	Vestígios

Fonte: Castro e Andrade (2007)

Tabela 2 - Composição centesimal média dos constituintes orgânicos de uma cana-de-açúcar sadia e madura.

	Celulose	5,5
Fibra	Pentosana (Xilana)	2,00
	Goma da cana (Arabana)	0,5
	Lignina	2
	Sacarose	12,5
	Glicose ou Dextrose	0,9
Açúcares	Frutose ou Levulose	0,6
	Albiminoides	0,12
	Amidas (Asparagina)	0,07
Corpos Nitrogenados	Aminoácidos (Ácidos aspárticos)	0,2
	Ácido nítrico	0,01
	Amoníaco	vestígios
	Substâncias Xânticas	vestígios
	Graxas e Ceras	0,2
	Peetinas	0,2
	Ácido málico (Livre)	0,08
	Ácido succínico (Combinado)	0,12

Fonte: Castro e Andrade (2007)

3.1.2 Obtenção do açúcar

O açúcar é o resultado de um processo de refinamento que começa na plantação e colheita da cana-de-açúcar, que é a sua matéria-prima. A cana é colhida inteira por meio de corte manual ou máquina e é imediatamente levada para uma higienização, que retira suas impurezas e para deixá-la o mais limpa possível. Quando limpa, a cana é fragmentada por grandes trituradores, o que faz com que facilite a extração do caldo da cana (ALVES, 2019).

Para que a extração de caldo seja mais eficiente, o bagaço, que é a parte sólida restante da moagem, é misturado com água quente, possibilitando uma melhor

extração de caldo. O caldo misto, que é o que sai naturalmente apenas com a moagem, é levado ao laboratório, onde são realizados testes químicos de pH e níveis de açúcar. Em seguida, esse caldo recebe um tratamento químico que corrige a coloração e posteriormente levado para a fabricação (ALVES, 2019).

Após uma série de operações como purificação do caldo, sulfitação, calagem, decantação e filtração, alcança-se um dos processos mais importantes da indústria açucareira: a evaporação. Nesse processo o caldo contém aproximadamente 74% de água, que deve ser retirada no processo de obtenção do açúcar para concentrar a sacarose e obter o xarope. A evaporação é um dos processos mais importantes na indústria, pois é uma operação que exige a maior eficiência. Por esse motivo, o escopo deste trabalho é dedicado às operações de evaporação realizadas na indústria açucareira (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

3.2 Evaporação

A evaporação é uma operação utilizada na indústria com o objetivo de retirar solventes de uma solução líquida por meio do aquecimento e/ou diminuição da pressão. Esta operação ocorre em um evaporador, e é usada para concentrar uma solução composta por um soluto não-volátil e um solvente volátil. A concentração da solução ocorre por meio da ebulição da solução com a retirada do vapor produzido (ARAÚJO, 2011).

No setor sucroenergético o objetivo de uma evaporação é remover a água presente no caldo clarificado a fim de obter o xarope no final do processo. Em uma usina a remoção dessa água é feita em duas etapas, que são a evaporação propriamente dita, onde a concentração inicial do caldo é de Brix 15 até 55 – 70 de Brix e o cozimento que concentra o xarope até a formação dos cristais (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

3.2.1 Tipos de Evaporadores

Acredita-se que a diversidade de evaporadores vem de operações que são realizadas sob diferentes soluções e sob diferentes condições econômicas. A variação desses projetos de evaporadores e suas melhorias são as melhores soluções para resolver problemas de corrosão, escamação, formação de espuma, sensibilidade ao calor e restrições de espaço (FOUST et al, 1982).

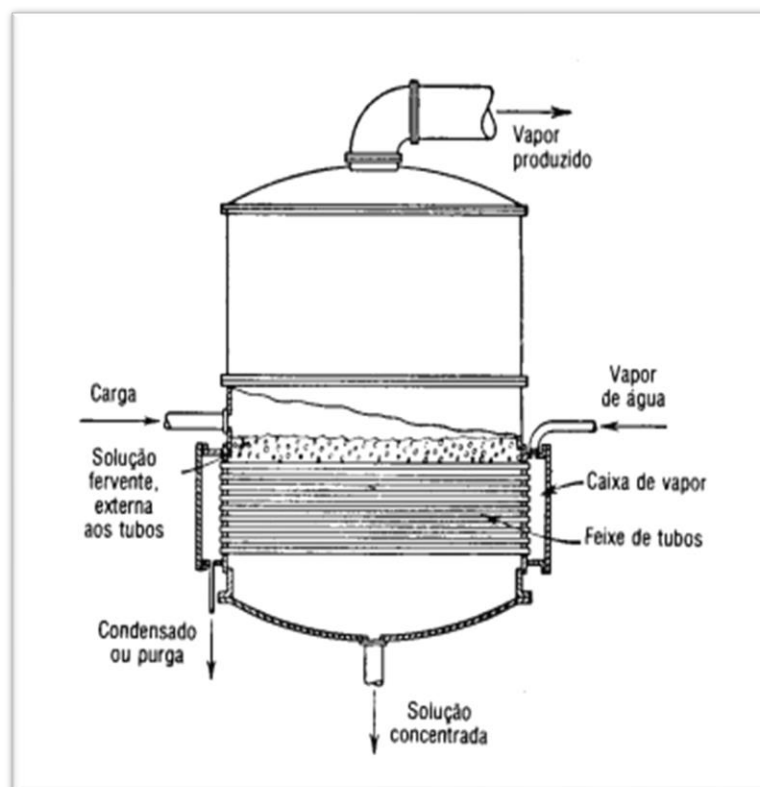
Segundo Araújo (2011) costuma-se classificar os evaporadores em três categorias:

- Evaporadores de Circulação Natural;
- Evaporadores de Circulação Forçada;
- Evaporadores de Película.

3.2.2 Evaporadores de Circulação Natural

A circulação natural está dividida em dois tipos de evaporadores. Evaporadores com tubos horizontais e evaporadores de tubos verticais. Os evaporadores de tubos horizontais (Figura 2) são um dos tipos de construção clássica e por muitos anos foi amplamente utilizado. O diferencial dele para os demais é que a solução ferve no exterior dos tubos horizontais enquanto o vapor passa na parte interna. Pelo fato de os tubos serem horizontais isso interfere na circulação natural do líquido fervente e, assim, diminuindo a sua agitação. Isso causa uma queda no coeficiente global de transmissão desses evaporadores (FOUST et al, 1982).

Figura 2 - Evaporador de tubos horizontais



Fonte: Foust et al (1982)

3.2.2.1 Evaporadores de tubos verticais tipo calandra, padrão ou Roberts

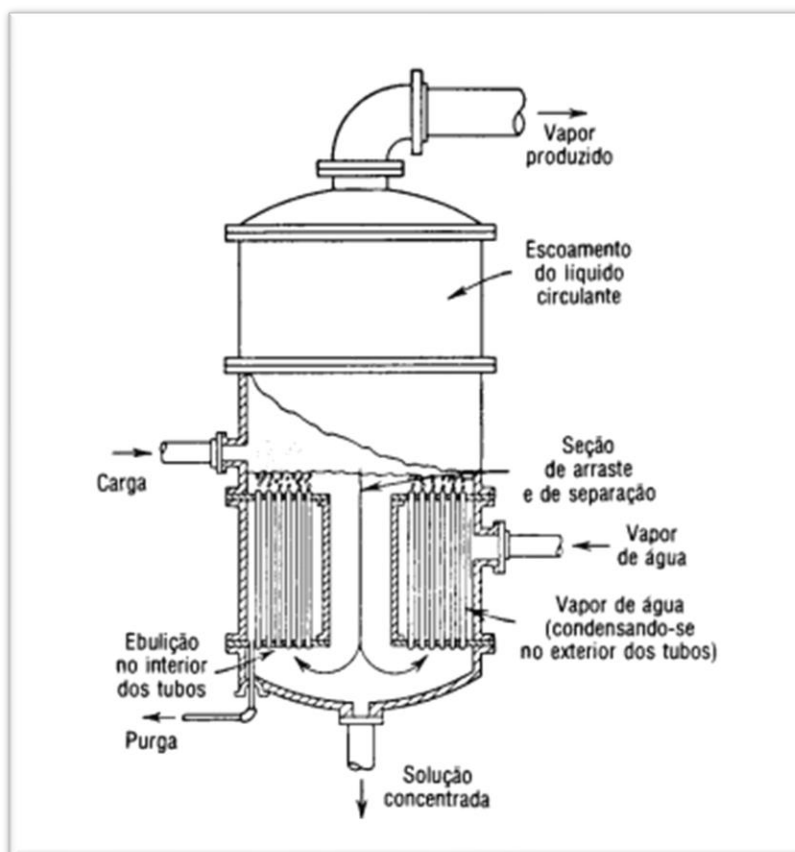
Os evaporadores de tubos verticais são um dos tipos mais antigos ainda em funcionamento, sendo muito utilizado em usina para concentrar o caldo na produção do açúcar (ARAÚJO, 2011).

No Brasil, esse tipo de evaporador ainda é o mais utilizado para concentrar caldo de cana na produção de açúcar devido a sua área de aquecimento (ARAÚJO, 2011).

No evaporador tipo Robert, há um feixe de tubos verticais em seu interior por onde escoar o caldo de maneira ascendente e no centro do evaporador há um tubo central de maior diâmetro que os demais por onde escoar o concentrado. No lado do casco, há a entrada de vapor saturado, sendo realizada a troca térmica entre o caldo no interior dos tubos e o vapor do lado externo (SILVA, 2013).

Embora tenha uma geometria simples, como apresentado na Figura 3, o funcionamento deste evaporador é complexo. No início da operação, o caldo é inserido no interior dos tubos até uma altura intermediária. Aquecido pelo vapor, esse caldo começa a formar bolhas, que tornam a coluna em seu interior composta por duas fases, a do líquido e a do seu vapor, este com densidade inferior àquela do tubo central. Isso fornece a força motriz para a circulação do fluido ascendente nos tubos e descendente no tubulão central (SILVA, 2013).

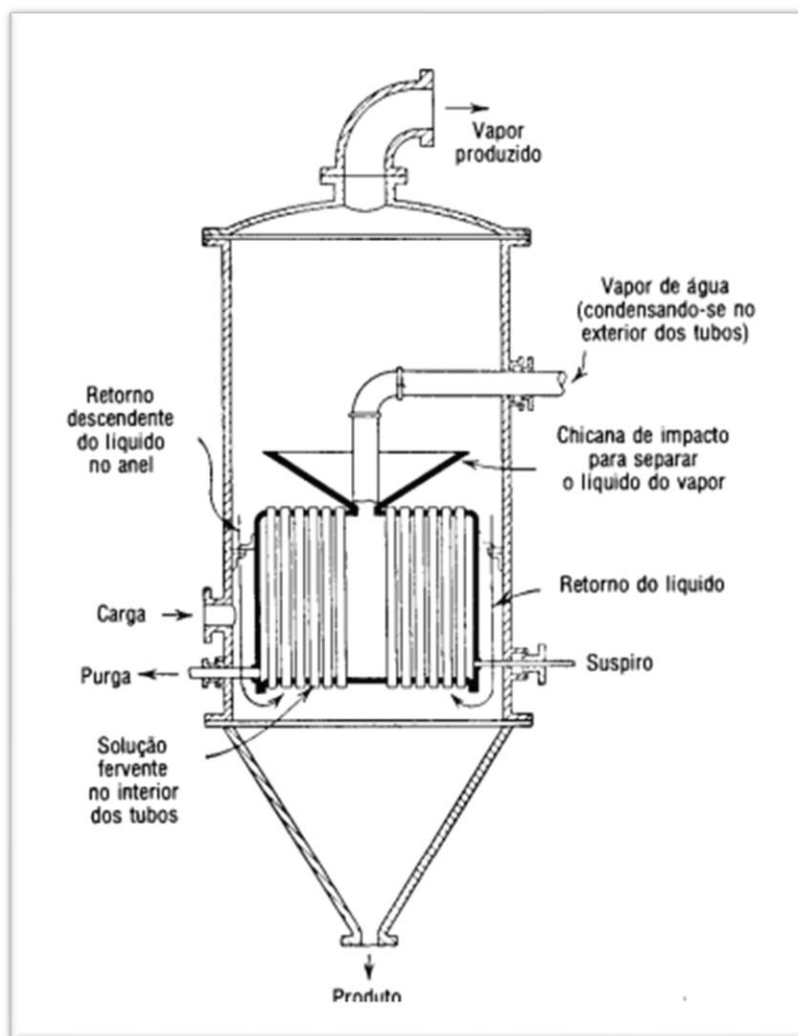
Figura 3 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra



Fonte: Foust et al (1982)

3.2.2.2 Evaporadores de tubos verticais tipo cesto

Esse tipo de evaporador, apresentado na Figura 4, é semelhante ao do tipo calandra e tem as mesmas funções e aplicações, exceto o canal de retorno que não é centralizado. O elemento de aquecimento é fácil de remover e não causa problemas de expansão diferencial.

Figura 4 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo cesto

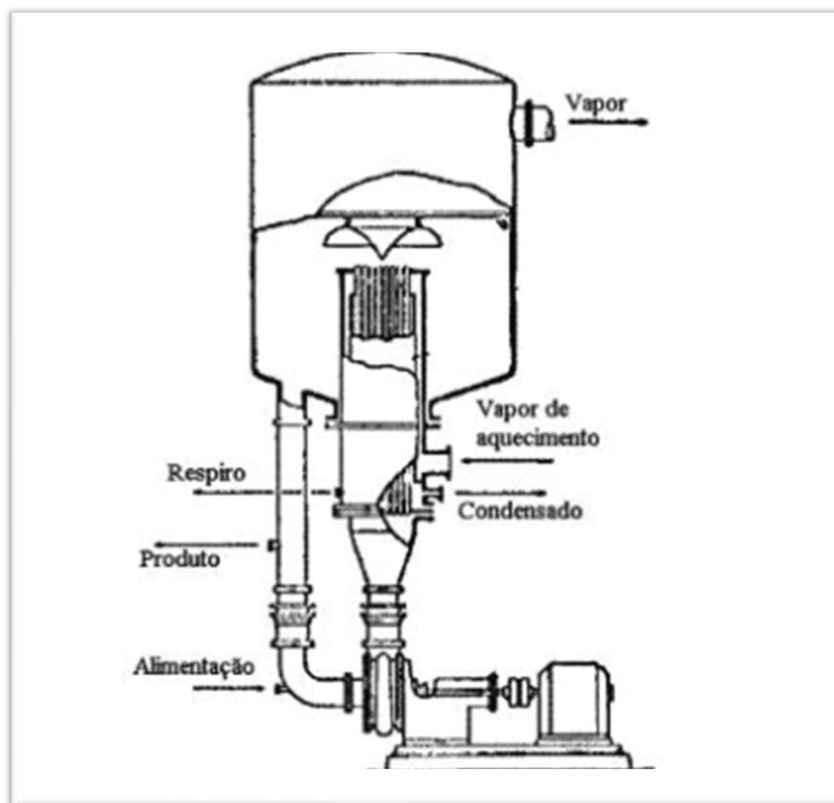
Fonte: Foust et al (1982)

3.2.3 Evaporadores de Circulação Forçada

Esse tipo de evaporador pode não ser tão econômico quanto um evaporador com circulação natural, porém eles são necessários quando o problema envolve uma solução com escoamento pobre, incrustação e características térmicas. Os evaporadores com circulação forçada são os mais indicados para fluidos muito viscosos. Além disso, quando existe uma tendência à formação de incrustação ou de depósitos salinos, as elevadas velocidades obtidas por meio do uso de bombas de circulação constituem o único método para impedir a formação de depósitos excessivos. O evaporador com circulação forçada é bem adaptável para o controle do escoamento. O vapor de água penetra por meio do feixe externo do corpo do evaporador, como visto na Figura 5, e entra em contato com os tubos no topo do feixe

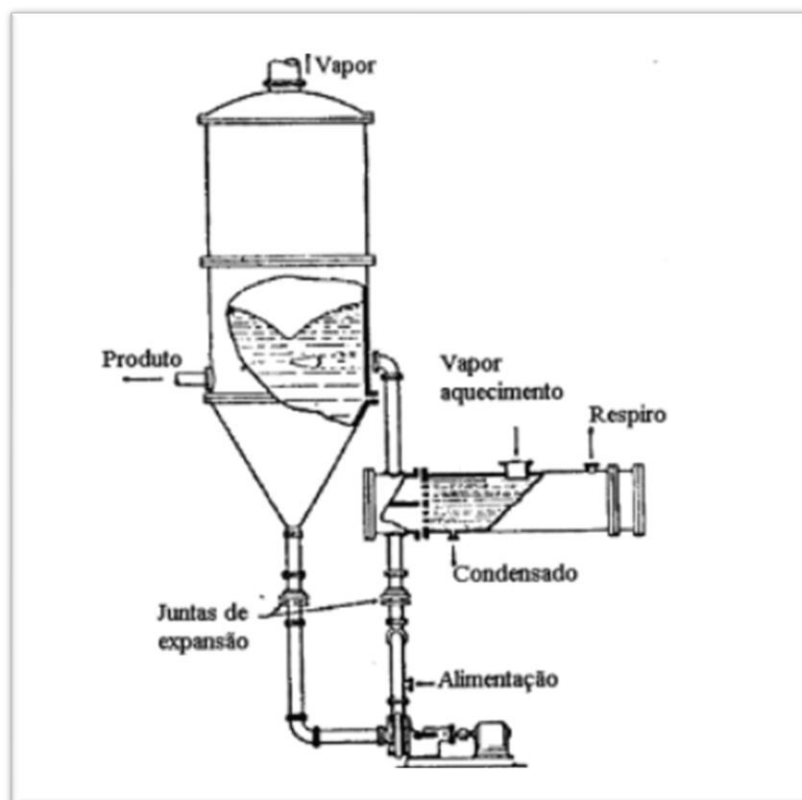
por meio de um espaço anular existente. Instala-se uma placa defletora acima do espelho superior e coloca-se a bomba de circulação no nível do chão. Cabe destacar que esse tipo de evaporador pode apresentar uma variação com um feixe horizontal, como ilustrado pela Figura 6, que é particularmente adaptável quando o espaço disponível é pequeno (SILVA, 2013).

Figura 5 - Evaporador com circulação forçada com elemento externo vertical



Fonte: Silva (2013)

Figura 6 - Evaporador com circulação forçada com elemento externo horizontal.



Fonte: Silva (2013)

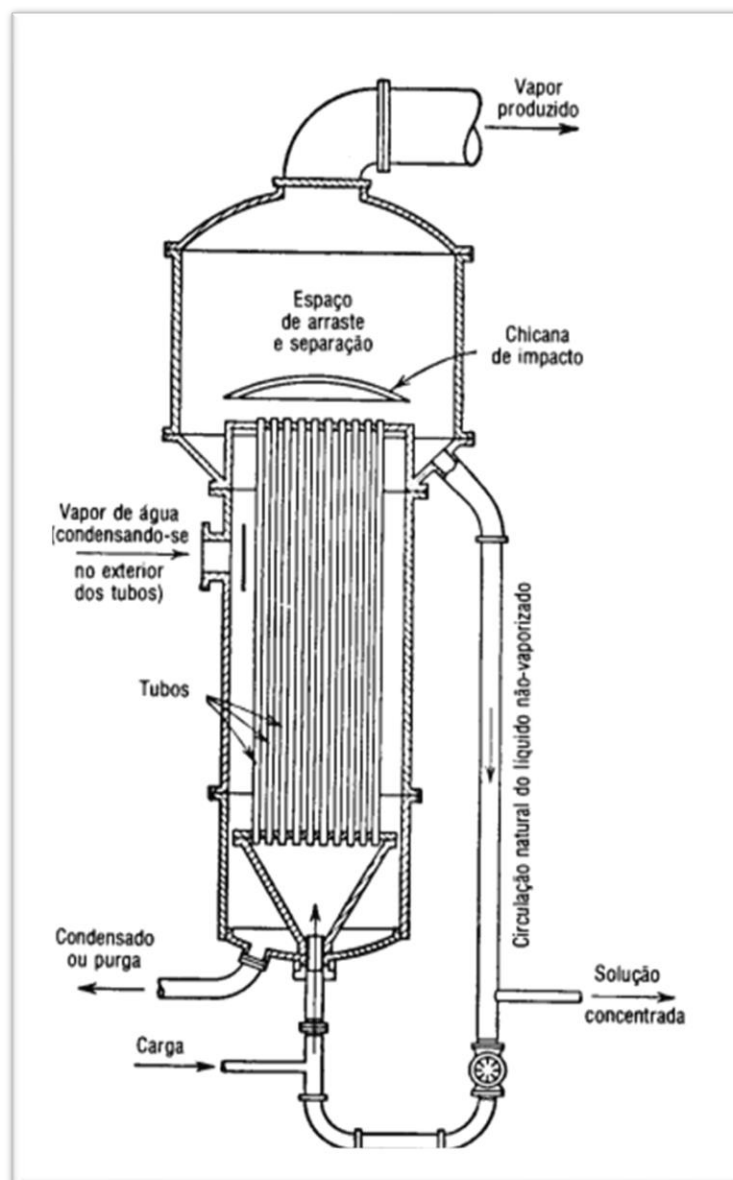
3.2.4 Evaporadores de Película

São subdivididos em: evaporador de película ascendente, evaporador de película descendente, evaporador de película ascendente-descendente, evaporador a película turbulenta e evaporadores de placas.

3.2.4.1 Evaporador de película ascendente

Segundo Araújo (2011) o primeiro evaporador citado no subtópico anterior é um dos mais encontrados na indústria e em diversos livros ele é considerado de circulação natural. Sua utilização permite que a solução passe apenas alguns segundos nele evitando assim a decomposição ou alterações térmicas de algumas substâncias. Seu comprimento varia de 3,5m a 11m, enquanto que o diâmetro varia entre 19mm a 50mm. São equipamentos capazes de impedir o arraste de espuma, portanto são usados com soluções que tendem a formar espumas. O evaporador de película ascendente é retratado na Figura 7.

Figura 7 - Evaporador de tubos verticais longos ou de películas ascendentes

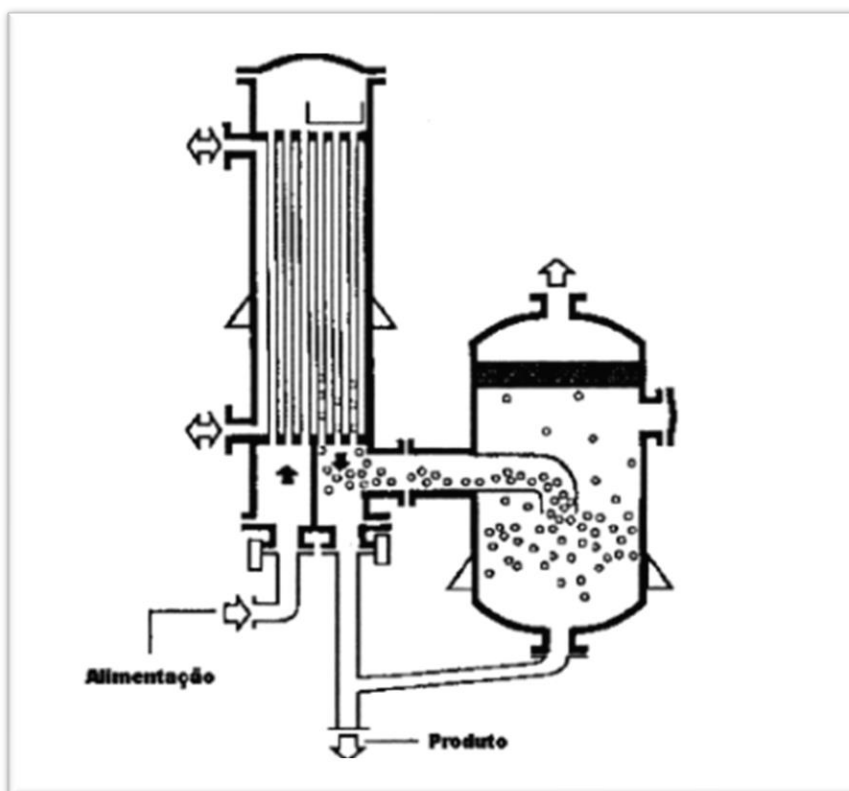


Fonte: Foust et al (1982)

3.2.4.2 Evaporador de película ascendente-descendente

É a junção dos evaporadores ascendente e descendente, um equipamento com tubulações menores em relação aos modelos que inspiraram a sua criação. Do mesmo modo que o evaporador de película ascendente, ele possui a característica de apresentar facilidade de distribuição da alimentação. Na Figura 8 o evaporador de película ascendente-descendente é apresentado (ARAÚJO, 2011).

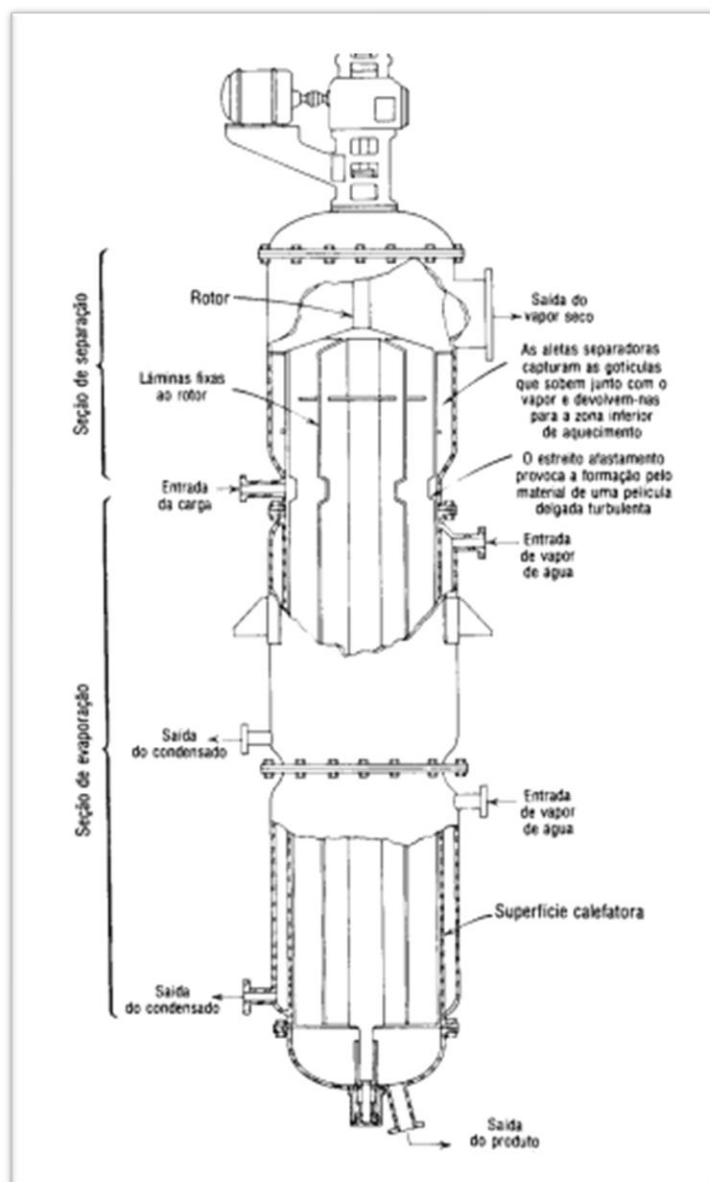
Figura 8 - Evaporador de película ascendente-descendente



Fonte: Araújo (2011)

3.2.4.3 Evaporador a película turbulenta

Foust (1982) faz referência ao evaporador a película turbulenta. Equipamento utilizado para atuar com líquidos viscosos. Além de operar com tempo de residência pequeno do fluido no evaporador. A unidade consiste num tubo vertical que tem uma camisa de aquecimento a vapor que vai da sua base até dois terços da altura e que é provido de um rotor central, conforme esquematizado na Figura 9.

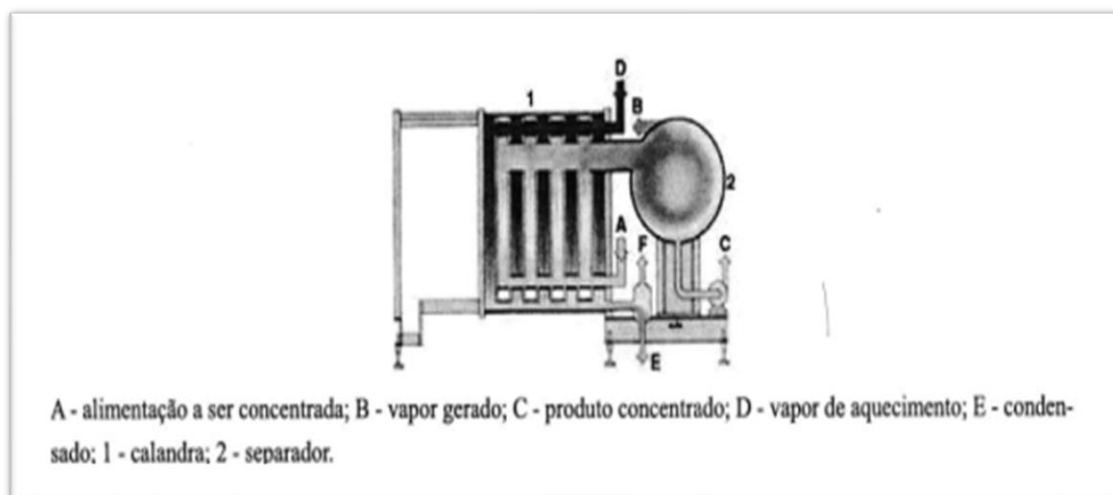
Figura 9 - Evaporador a película turbulenta

Fonte: Foust et al (1982).

3.2.4.4 Evaporadores de placas

Evaporadores de placas, como apresentado na Figura 10, são equipamentos compactos, com o separador conectado ao conjunto de placas, ocupam um espaço pequeno e a altura é inferior a 4m. São versáteis, a superfície de troca pode ser facilmente inspecionada e modificada. Podem operar como evaporadores de película ascendente, descendente ou, ainda, ascendente-descendente. Neles também, podem ser obtidas altas velocidades de escoamento, as quais reduzem as incrustações (ARAÚJO, 2011).

Figura 10 - Esquema de um evaporador de placas

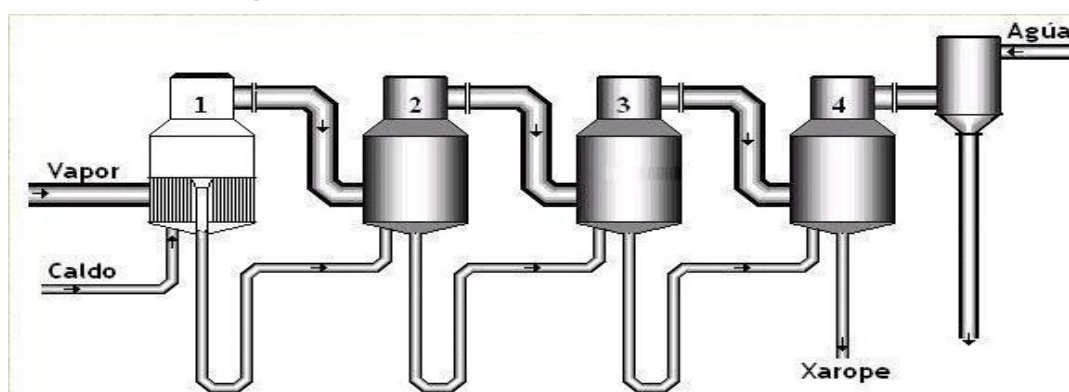


Fonte: Araújo (2011)

3.3 Evaporação em conjunto ou múltiplo efeito

O progresso mais importante e marcante na história da fabricação do açúcar é, sem dúvida, a criação do múltiplo efeito, como visto na Figura 11, por volta de 1830 na Louisiana, por Norbert Rillieux, americano de descendência francesa (HUGOT, 1977).

Figura 11 - Esquema de um evaporador com quatro efeitos



Fonte: Hugot (1977)

A evaporação do caldo de cana na maioria das usinas de açúcar do Brasil é realizada em evaporadores com quatro efeitos. Atualmente, de forma a aumentar a capacidade de evaporação, tem-se instalado um quinto vaso conhecido como pré-evaporador e que na prática funciona como uma primeira etapa da evaporação, o que faz com que esta operação seja realizada em um quádruplo efeito (SANTOS, 2007).

Araújo (2011) expõe que a solução produzida no primeiro efeito ao ser enviada para o segundo efeito, tornar-se a mais concentrada, e isto ocorre cada vez que ela é redirecionada para um próximo corpo. A pressão do próximo estágio será menor que a do anterior, assim como a temperatura de ebulição da solução mais concentrada será inferior à temperatura de ebulição menos concentrada.

É empregado esse tipo de evaporação nas usinas de cana-de-açúcar por se tratar de uma grande economia de vapor e também por que os efeitos da inversão e caramelização são reduzidos. Estes efeitos causam a destruição da sacarose, por isso é indesejável a ocorrência dos mesmos no processo de evaporação (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

Quanto a economia de vapor, pode-se inferir que em duplo efeito será de 50% em economia de vapor e em quádruplo efeito será de 75%. Nota-se que quanto maior a quantidade de efeito maior será a economia de vapor (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

Segundo Hugot (1977) a aplicação do múltiplo efeito só é possível devido à utilização de vácuo e o conhecimento pressão de vapor de água. O vácuo é utilizado após o primeiro efeito de modo a aumentar a diferença total de temperatura entre o vapor de um evaporador e a temperatura de ebulição do caldo no próximo evaporador (SILVA, 2013).

A ebulição a vácuo também permite continuar a evaporação com temperaturas menos prejudiciais, sob o ponto de vista da inversão e da coloração do caldo, à medida que o caldo se torna mais concentrado e mais viscoso (ARAÚJO, 2011).

3.4 Principais problemas com a evaporação

A evaporação é uma das principais operações e, conseqüentemente os problemas que podem ocorrer nesta etapa são grandes. Para que se tenha um bom rendimento e assim gerar lucros a indústria açucareira, faz-se necessário o conhecimento de alguns problemas que podem ocorrer durante a evaporação. Alguns são gerados na própria operação outros são oriundos de operações anteriores, abaixo estão listados alguns dos principais problemas na evaporação (CORDEIRO JUNIOR, 2009):

- Perdas de sacarose por arraste;
- Perdas por inversão;
- Brix de xarope baixo

3.4.1 Perdas de sacarose por arraste

É a perda que ocorre quando o evaporador está trabalhando com um nível elevado de caldo, ou quando o evaporador é mal projetado (CASTRO; ANDRADE, 2007).

Segundo Cerca e Esparza (1986) as perdas de sacarose por arraste não apenas têm importância desde o ponto de vista da recuperação, como também evitando acidificar as águas que alimentam as caldeiras de vapor, e ainda por outro lado, corroer o condensador e tubulações. Todas as águas de condensação devem estar com o pH entre 6.8 e 7.2.

3.4.2 Perdas por inversão

É a perda que ocorre pela transformação da sacarose por hidrólise para a produção de frutose e glicose. Essa perda por inversão é diminuída quando o pH está em 7 ou até mesmo alcalino, caso esteja ácido, ocorre sério risco de acontecer a perda por inversão. Ainda podendo levar a perda por inversão, no caso de as calandras estarem descobertas. Neste caso, pode-se evitar colocando niveladores automáticos ou na falta deles, pedindo cuidado dobrado dos operadores (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

3.4.3 Brix do xarope baixo

O Brix do xarope deve ser mantido entre 60 – 70° a fim de se obter uma melhor economia de vapor, um menor tempo de operação na etapa de cozimento e um menor volume de xarope, evitando que os tanques pulmões se tornem cheios, podendo causar redução, ou até mesmo paradas na moagem. Desta forma é de grande importância manter o Brix entre 60 – 70° (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

Segundo Hugot (1977), as causas que podem contribuir para a obtenção de um xarope com baixo Brix são:

- Pressão de vapor de escape baixo;
- Vácuo baixo;
- Incrustação nos evaporadores;
- Circulação deficiente do caldo de um corpo para o evaporador;
- Nível incorreto do caldo na calandra;

- Tubos soltos ou furados na calandra.;
- Extração de gases incondensáveis deficiente;
- Drenagem dos condensados deficiente;
- Curto circuito na circulação do caldo;
- Temperatura do caldo clarificando muito baixa.

Há também problemas que acontecem com bastante frequência na pratica e também causam a baixa do Brix do xarope, são eles:

- Moagem excessiva: um sistema de evaporação é criado para atender uma determinada moagem. Se esta moagem prevista é excedida, os evaporadores não tem a capacidade suficiente de evaporar a quantidade certa de água e o Brix do xarope diminuirá (HUGOT, 1977)
- Uso de água extra na indústria é comum o uso adicional de água na indústria, para limpeza da moenda, limpeza dos vácuos, vazamento, mangueiras abertas e etc. Às vezes esse excesso de água é misturado com o caldo e terá que ser posteriormente evaporado. Quando os evaporadores estão sobrecarregados, uma redução no Brix de xarope poderá ocorrer. Portanto, água que não colabora com a extração de açúcar, não deve ser misturada com o caldo (CORDEIRO JUNIOR, 2009).
- Embebição excessiva: processo de adição de água com objetivo de aumentar a extração do caldo da cana. Às vezes embebição muito alta é usada para tentar aumentar a extração de caldo nas moendas. Esta carga adicional nos evaporadores produzirá um xarope com baixo Brix (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

O Brix do xarope é o parâmetro de maior importância durante o processo de evaporação em uma usina e esse é o principal escopo deste trabalho, manter o Brix entre 60 e 70 é complexo. Mas se tiver um conhecimento bem detalhado dos fatores que influenciam na diminuição do Brix poderá ter uma evaporação eficiente e com um ótimo rendimento, com isso será detalhado os principais fatores que influenciam na evaporação.

3.5 Fatores que influenciam no múltiplo efeito

Segundo Castro e Andrade (2007), os fatores são:

- Calor necessário para elevar a temperatura da solução a ser concentrada, até o ponto de ebulição no primeiro efeito;
- Perdas de calor por condução e irradiação;
- Perdas de calor na extração das águas condensadas;
- Aumento do calor latente do vapor à medida que a temperatura decresce;
- Diminuição do calor específico da solução que está sendo concentrada à medida que esta é concentrada;
- Flash – reevaporação – da solução a ser concentrada ao entrar no efeito seguinte de menor pressão e temperatura;
- Flash – reevaporação dos gases condensados.

3.5.1 Pressão de vapor de escape baixo

Geralmente, a capacidade de um conjunto de evaporadores é projetada para uma dada pressão e temperatura. No vapor de escape normalmente a pressão de trabalho é entre 1,3 – 1,7 Kgf/cm², se a pressão é reduzida devido a diminuição da diferença total da temperatura, a capacidade do sistema também é reduzida. Ao mesmo tempo, pressões maiores que 2,0 kgf/cm² devem ser evitadas, pois a exposição do caldo a temperatura muito elevada é prejudicial devida a caramelização da sacarose, provocando perda de açúcar e formação de cor (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

3.5.2 Vácuo baixo

O vácuo no ultimo efeito na evaporação deverá ser na ordem de 0,83 a 0,90 atm. É muito importante entender os princípios básicos da evaporação em um múltiplo efeito e as funções do vácuo nesta operação. Algumas necessidades do vácuo no ultimo efeito estão listadas abaixo, conforme detalhado por Bortolotti (2016): Redução do ponto de ebulição: o ponto de ebulição abaixa com o aumento do vácuo, e isto permite evaporar água do caldo em ambientes com baixas temperaturas.

- Destruição de açúcar: prevenir a inversão e destruição do açúcar evitando a exposição do caldo a altas temperaturas por um longo intervalo de tempo;
- Economia de vapor: de acordo com o primeiro princípio de Rellieux, “em uma evaporação com múltiplo efeito, para cada Kg de vapor usado, tantos Kg de água serão evaporados quanto ao número de efeitos no conjunto”;
- Diferencial de temperatura: para obter uma eficiente evaporação em um múltiplo efeito é necessário um alto vácuo e consequentemente o máximo diferencial de temperatura, obtendo altas taxas de evaporação;
- Múltiplo uso do calor latente: evaporação em múltiplo efeito consiste no múltiplo uso do calor latente em sucessivas operações. Está é uma das mais simples formas de economizar vapor.

3.5.3 Pressão diferencial incorreta

Para ser possível a evaporação em um projeto múltiplo efeito, é necessário que ocorra uma baixa na pressão entre as caixas, estabelecendo um adequado diferencial de temperatura. Se estas condições de operação não forem estáveis, o múltiplo efeito não poderá trabalhar de maneira desejada. A condição inicial exigida é o ponto de ebulição ou temperatura do caldo em uma caixa, seja inferior que a temperatura do vapor que entra na calandra desta caixa. Este diferencial de temperatura é que permitirá a transferência de calor do vapor para o caldo através dos tubos da calandra (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

Hugot (1977) apresenta uma pequena descrição sobre pressão e ponto de ebulição, elevação do ponto de ebulição, transferência de calor e circulação do caldo e detalha uma relação deles com a pressão diferencial, evidenciado abaixo:

- Pressão e ponto de ebulição: cada líquido tem-se seu ponto de ebulição o qual é constante para uma dada pressão, mas este ponto de ebulição sofre uma baixa quando a pressão que atua em sua superfície diminui;
- Elevação do ponto de ebulição: no caso da indústria de açúcar o líquido a ser evaporado não é a água pura, mas sim uma solução contendo açúcar e outros sólidos. O ponto de ebulição, neste caso, é maior que o da água a uma mesma pressão. Esta elevação do ponto de ebulição

(EPE) é proporcional ao peso dos sólidos dissolvidos ou Brix. Quanto maior for o Brix do caldo, maior o ponto de ebulição.

- Transferência de calor: evaporação em um projeto de múltiplo efeito depende primeiramente da transferência de calor do vapor (calor latente) através dos tubos da calandra o qual ao ceder calor para o caldo a uma temperatura mais baixa irá transforma-se em condensado. Portanto, quanto mais rápido o calor é transferido, mais rápido a evaporação irá ocorrer.
- Circulação do caldo: em múltiplo efeito, normalmente, o caldo clarificado é alimentado no primeiro efeito por meio de bomba. O fluxo do caldo para os efeitos é realizado simplesmente pelo diferencial de pressão existente entre eles. Quando este diferencial é adequado ocorre uma melhor circulação do caldo auxiliando a transferência de calor e a diminuição na formação de incrustações.

3.5.4 Incrustações

Durante a evaporação, a concentração do caldo aumenta gradativamente da primeira até a última caixa. Uma enorme quantidade de impurezas que estão presentes no caldo tornam-se menos solúveis precipitando e posteriormente sendo depositadas na superfície interna dos tubos da calandra, formando incrustações (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

As incrustações são, principalmente, formadas de sais de cal, óxidos metálicos, silício, sulfitos (HUGOT, 1977). Sobre o estudo de composição de incrustações é importante observar:

- A formação da incrustação é sempre maior no último efeito;
- Os silicatos são encontrados em maior quantidade nas duas últimas caixas;
- Matéria orgânica é encontrada em maior quantidade no pré-evaporador;
- A presença elevada de óxidos de ferro (Fe_2O_3) normalmente, indica efeitos de corrosão elevada;
- Os teores de magnésio e fosfatos são baixos nas incrustações.

3.5.4.1 Efeitos da formação de incrustações

Segundo Hugot (1977) a formação de incrustações pode causar grandes problemas para a evaporação, alguns estão listados abaixo:

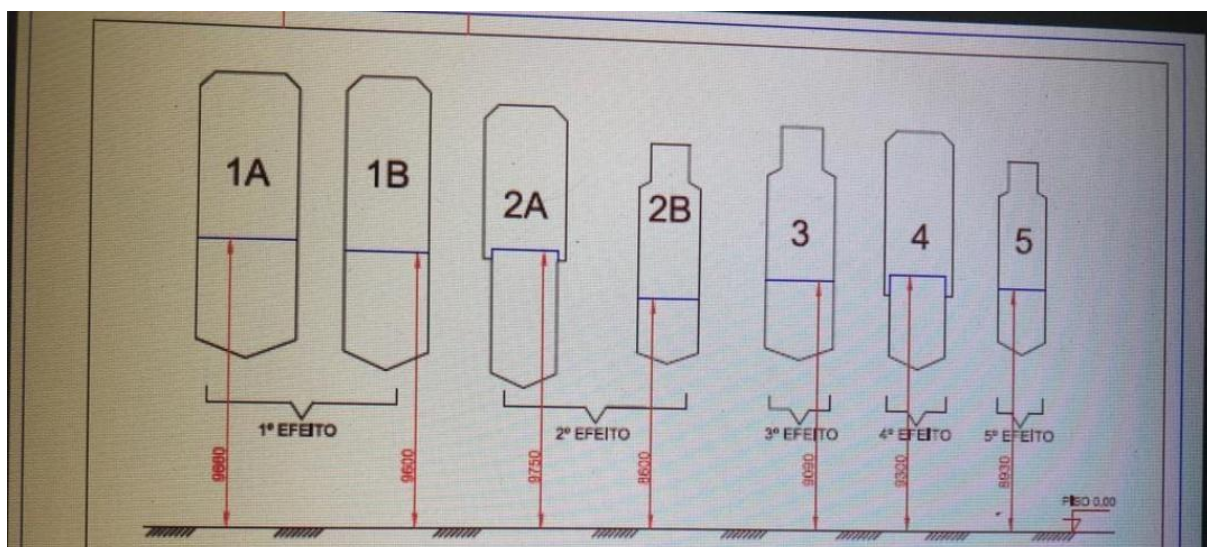
- Redução do coeficiente de transmissão de calor;
- Redução do brix de xarope;
- Aumento no consumo de vapor;
- Pressão alta na calandra das primeiras caixas;
- Vácuo menor que o normal em alguns dos efeitos;
- Diminuição no volume de condensados;
- Diminuição da taxa de evaporação.

Estes efeitos causam redução da capacidade de moagem, paradas para a limpeza e consequente aumento da safra, gastos com mão-de-obra, equipamentos e mais produtos químicos, necessidade de redução na taxa de embebição, gastos com equipamentos reservas, superdimensionamento dos equipamentos e entre outros (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

4 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho é avaliar a eficiência dos evaporadores usados em uma usina de cana de açúcar, e para isso, foi observado o conjunto de evaporadores da Usina Cucaú, rodovia PE-073 em Rio Formoso – Pernambuco. Atualmente a usina trabalha na produção de álcool e açúcar. A observação foi realizada pelo próprio autor deste trabalho a fim de acompanhar toda a operação de evaporação durante o período do mês de janeiro, foram coletadas 7 amostras. Por fim, por meio de cálculos baseados em parâmetros operacionais foi comparado os resultados no início da safra com os resultados durante o mês de janeiro, chegando a uma conclusão a respeito da eficiência do conjunto de evaporadores, conforme Figura 12.

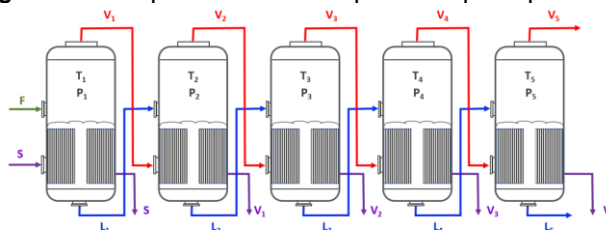
Figura 12 – Planta de Evaporação da Usina Cucaú



Fonte: Autor (2022)

A Figura 13 mostra o esquema de um conjunto de evaporadores de múltiplo efeito e o percurso do caldo no processo.

Figura 13 – Esquema de um evaporador quádruplo efeito.



Fonte: Severino (2019)

4.1 Evaporadores: parâmetros operacionais e cálculos teóricos

A Usina Cucaú conta com conjuntos de evaporadores em quádruplo efeito sendo distribuídos da seguinte forma: no primeiro efeito são 2 (Caixa 1A e Caixa 1B), no segundo efeito são 2 (Caixa 2A e Caixa 2B), no terceiro efeito é só 1 caixa, no quarto efeito 1 caixa e por fim, no quinto efeito 1 caixa com uma produção de 354 ton/h de caldo, todo o conjunto de evaporação estão respectivamente representado nas seguintes figuras. Figura 14, 15, 16, 17, 18, 19.

Os cálculos envolvidos neste trabalho foram baseados na temperatura usada em cada efeito. Com base nisso encontrou-se o consumo de vapor e a quantidade total de água evaporada. Tendo encontrado o consumo de vapor em cada efeito foi possível calcular o Brix e o Brix médio e posteriormente a taxa de evaporação específica.

Figura 14 – Caixa 1A e 2B



Fonte: Autor (2022)

Figura 15 – Caixa 1B



Fonte: Autor (2022)

Figura 16 – Caixa 2B



Fonte: Autor (2022)

Figura 17 – Caixa 3



Fonte: Autor (2022)

Figura 18 – Caixa 4



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 – Caixa 5



Fonte: Autor (2022)

4.2 Análises de laboratório

A realização das análises em laboratório do xarope que sai do conjunto de evaporadores foi feita para obter uma resposta real do Brix e desta forma poder comparar com o Brix encontrado nos cálculos durante o início da safra.

É desnecessário frisar que resultados analíticos altamente precisos podem não ter qualquer significância se a amostra coletada não representar fielmente o material original. A coleta de amostras tem, portanto, a mesma importância que o trabalho analítico desenvolvido nos laboratórios.

Como o caldo clarificado, o xarope não tem grande importância para o controle químico, a não ser quanto ao Brix, que deve ser verificado a cada instante na seção de evaporação. O controle exercido pelo laboratório, amostras instantâneas coletadas de hora em hora, ou amostras contínuas coletadas a cada 2 horas. (CORDEIRO JUNIOR, 2009).

Neste trabalho foram utilizadas as amostras coletadas em um único horário, pois quando se trata do conjunto completo só é feito uma análise por dia das 7 caixas de evaporação.

As amostras foram levadas para o laboratório e não possuem um volume fixo no momento da coleta, tendo momentos que o local onde retirou a amostra na Figura 20, ficou entupido e nessas situações não foi possível fazer a leitura do brix. Essas amostras são normalmente retiradas só do último efeito, mas nesse trabalho foi feito a análise de todo o conjunto.

Figura 20 - Ponto de coleta do xarope.



Fonte: Autor (2022)

A análise de xarope visou atender ao controle operacional no sentido de identificar algum desvio momentâneo das condições de operação desejadas.

Técnica: Resfriou-se a amostra de xarope até a temperatura ambiente e transferiu-se do recipiente onde foi coletada para um Becker. Em seguida, limpou-se os prismas do refratômetro, como visto na Figura 21, com água destilada e enxugou-se com papel. Com auxílio do bastão plástico, colocou-se algumas gotas da solução sobre o prisma e anotou-se a leitura do Brix refratométrico.

Figura 21 - Refratômetro.



Fonte: Autor (2022)

4.3 CONSUMO DE VAPOR

Para encontrar-se o consumo de vapor do conjunto de evaporadores foi preciso ter um controle exato da temperatura de entrada e de saída do caldo tanto nos aquecedores quanto das caixas de evaporação. Com esses dados calculou-se por meio de equações o consumo de vapor.

4.3.1 CÁLCULO DAS TEMPERATURAS DOS AQUECEDORES

Iniciou-se com os cálculos das temperaturas para o aquecimento nos pré aquecedores P_{A1} e P_{A2} onde recebem o vapor V3 (Vapor que sai do terceiro efeito), os cálculos começaram a partir da Equação 1:

$$C = 1 - 0,006 \times B_0 \quad (1)$$

onde B_0 é o Brix inicial.

Após o cálculo do calor específico do caldo iniciou-se o procedimento para obter o consumo de vapor, onde t_{cf} é a temperatura do caldo frio.

Para P_{A1} e P_{A2} tem-se o valor da temperatura no terceiro efeito, t_3 , ($^{\circ}\text{C}$) a partir da Equação 2:

$$t_3 = T_3 - (T_3 - t_{cf}) \times e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}} \quad (2)$$

onde k corresponde ao coeficiente de transmissão do aquecedor, dado por:

$$k_i = 5 \times T_i \sqrt{U + 0,04} \quad (3)$$

Com T_i sendo a temperatura do vapor aquecedor, em $^{\circ}\text{C}$, S a área de troca térmica dos aquecedores, P_c corresponde ao peso de caldo a ser aquecido.

Em seguida, obteve-se a temperatura para o aquecimento com V2, t_2 , (Vapor que sai do segundo efeito) para os aquecedores 1 e 2, por meio da Equação 4:

$$t_2 = T_2 - (T_2 - t_3) \times e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}} \quad (4)$$

Para obter a temperatura de V1 (Vapor que sai do primeiro efeito) que é utilizado nos aquecedores 3 e 4, tem-se a Equação 5:

$$t_1 = T_1 - (T_1 - t_2) \times e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}} \quad (5)$$

E por fim, para o aquecimento com o VS (Vapor servido que vem das caldeiras), onde t_0 para a Equação 6 é a temperatura inicial das caldeiras:

$$t_{VS} = T_{VS} - (T_{VS} - t_0) \times e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}} \quad (6)$$

4.3.2 CÁLCULOS DO CONSUMO DE VAPOR

Partindo-se para o cálculo do consumo de vapor dos aquecedores, utilizou-se a Equação 7:

$$M = P_c \times C - (T_i - t_{cf}) \times (1 - e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}}) \quad (7)$$

Consumo de vapor em V3, tem-se a equação 8:

$$M_3 = P_c \times C - (T_3 - t_{cf}) \times (1 - e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}}) \quad (8)$$

Como o resultado de M_3 foi obtido em kcal/h, faz-se a divisão de todos os resultados obtidos pelo calor latente para obter-se em Kg/h.

Consumo de vapor em V2, tem-se a equação 9:

$$M_2 = P_c \times C - (T_2 - t_3) \times (1 - e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}}) \quad (9)$$

Consumo de vapor em V1, tem-se a Equação 10:

$$M_1 = P_c \times C - (T_1 - t_2) \times (1 - e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}}) \quad (10)$$

Consumo de vapor em VS, onde t_0 para a Equação 11 é a temperatura inicial das caldeiras:

$$M_{VS} = P_c \times C - (T_{VS} - t_0) \times (1 - e^{-\frac{k \times S}{P_c \times C}}) \quad (11)$$

Vale salientar que a equação acima foi usada no primeiro, segundo efeito e terceiro efeito devido à ocorrência de sangramento, como nos demais efeitos esse sangramento não ocorre basta calcular a quantidade de água evaporada, essa quantidade de água foi calculada usando a Equação 12:

$$E = v \times (1 - \text{Brix inicial/Brix final}) \quad (12)$$

Encontrou-se a quantidade de água total a ser evaporada e assim fez-se os cálculos do consumo de vapor nos efeitos em que não ocorreu sangramento, por meio da Equação 13:

$$5 \times V_f + \sum \text{Sangramento} = E \quad (13)$$

4.3.3 BRIX E BRIX MÉDIO

Segundo Cordeiro Júnior (2009) com os valores do consumo de vapor encontrou-se o Brix em cada efeito, partindo do entendimento que o Brix do caldo inicial é de igual a 15 (quinze) tem-se:

Para o primeiro efeito, tem-se a Equação 14:

$$100 \times B_0 = (100 - S_1) \times B_1 \quad (14)$$

Onde S_1 é o consumo de vapor no primeiro efeito e B_0 corresponde ao valor do Brix do caldo na entrada dos pré-aquecedores igual a 15. O valor igual a 100 na Equação 14, corresponde a uma constante proposta por Hugot (1977).

Para o segundo efeito, tem-se a Equação 15:

$$100 - S_1 \times B_1 = (100 - S_1 - S_2) \times B_2 \quad (15)$$

Para o terceiro efeito, tem-se a Equação 16:

$$(100 - S_1 - S_2) \times B_2 = (100 - S_1 - S_2 - S_3) \times B_3 \quad (16)$$

Para o quarto efeito, tem-se a Equação 17:

$$(100 - S_1 - S_2 - S_3) \times B_3 = (100 - S_1 - S_2 - S_3 - S_4) \times B_4 \quad (17)$$

Para o Quinto efeito, tem-se a equação 18

$$(100 - S_1 - S_2 - S_3 - S_4) \times B_4 = (100 - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5) \times B_5 \quad (18)$$

Para calcular o Brix médio em cada efeito basta fazer a média aritmética, onde se pode expressar da seguinte forma:

$$B_{m_i} = \frac{B_i + B_{i+1}}{2}, \text{ com } i = 0,1,2,3,4 \quad (19)$$

4.3.4 TAXA DE EVAPORAÇÃO ESPECIFICA

A taxa de evaporação específica foi calculada por meio do Brix médio e da temperatura do vapor, de acordo com a Equação 23.

$$TEE_i = f \times (100 - B_{m_i}) \times (T - 54) \quad (20)$$

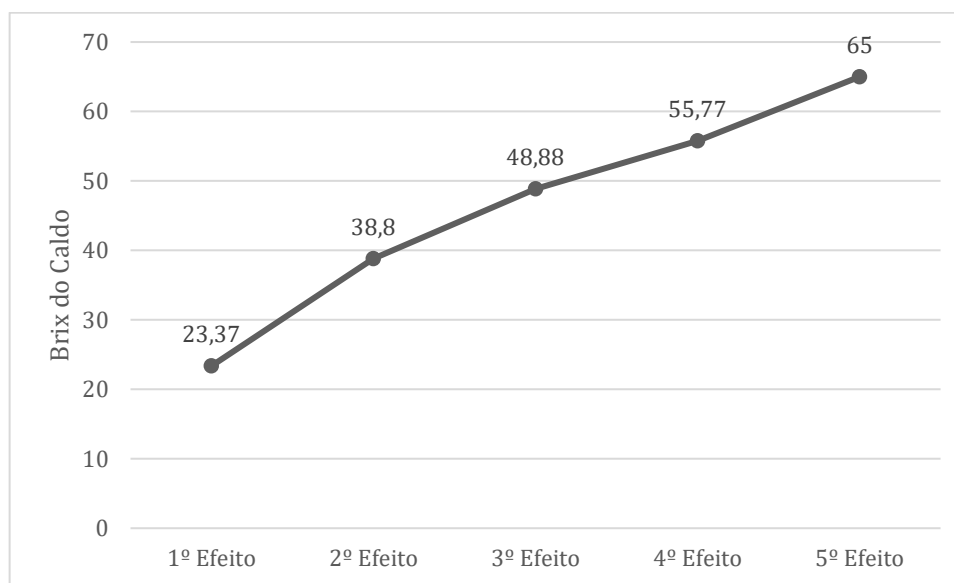
Cada evaporador tem uma temperatura diferente obedecendo uma ordem decrescente, sendo que apenas o primeiro efeito tem uma temperatura de vapor servido em torno de 125 °C, nos demais a temperatura é oriunda do efeito anterior e

por este motivo a um decréscimo na temperatura. Para cada efeito tem também um Brix médio. Portanto a equação acima foi usada em cada efeito a fim de encontrar a taxa de evaporação específica em cada um deles.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados do consumo de vapor e taxa de evaporação específica. É possível observar que a partir dos dados coletados no início da safra à medida que o caldo vai perdendo água durante a evaporação, o Brix do mesmo sofre um aumento durante o processo, na Figura 22 está representado o comportamento do Brix do caldo em função do efeito.

Figura 22 - Representa o Brix do caldo durante o processo de evaporação.

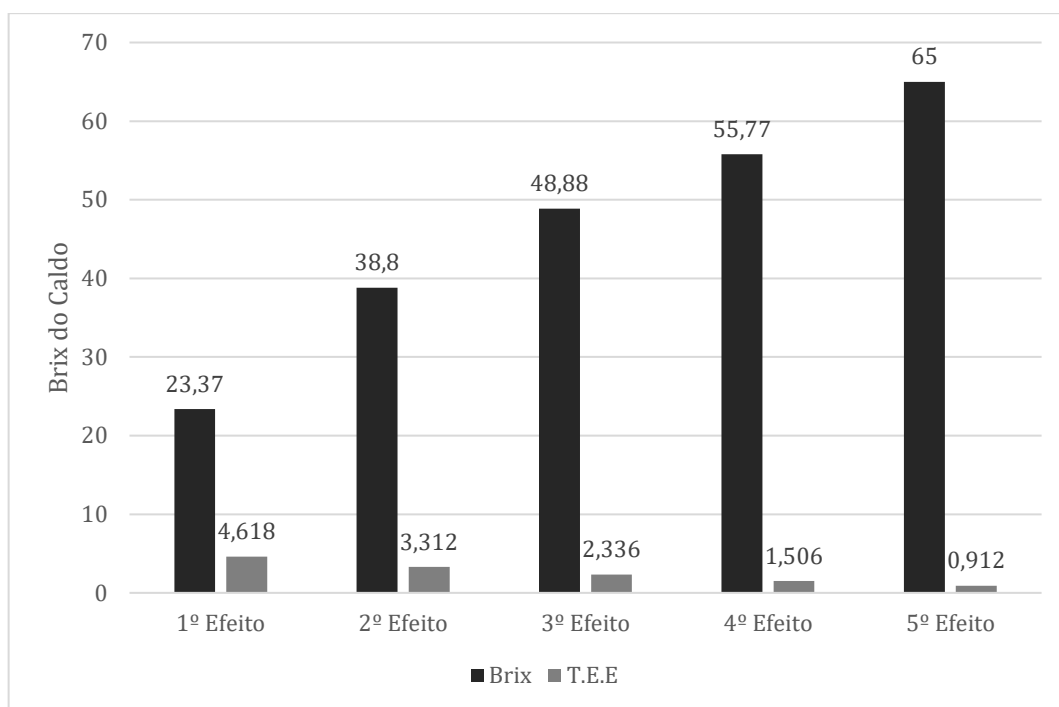


Fonte: Autor (2022)

Como exposto na Figura 22, a evaporação tem como principal objetivo retirar a água do caldo decantando e concentrar até chegar a um Brix de 65 onde estará em condições ideais para dar continuidade ao processo de obtenção de açúcar.

Já a taxa de evaporação específica (TEE) é inversamente proporcional ao Brix do caldo, ou seja, à medida que o Brix aumenta, a taxa de evaporação efetiva diminui, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Representa a comparação do Brix do caldo com a taxa de evaporação específica.

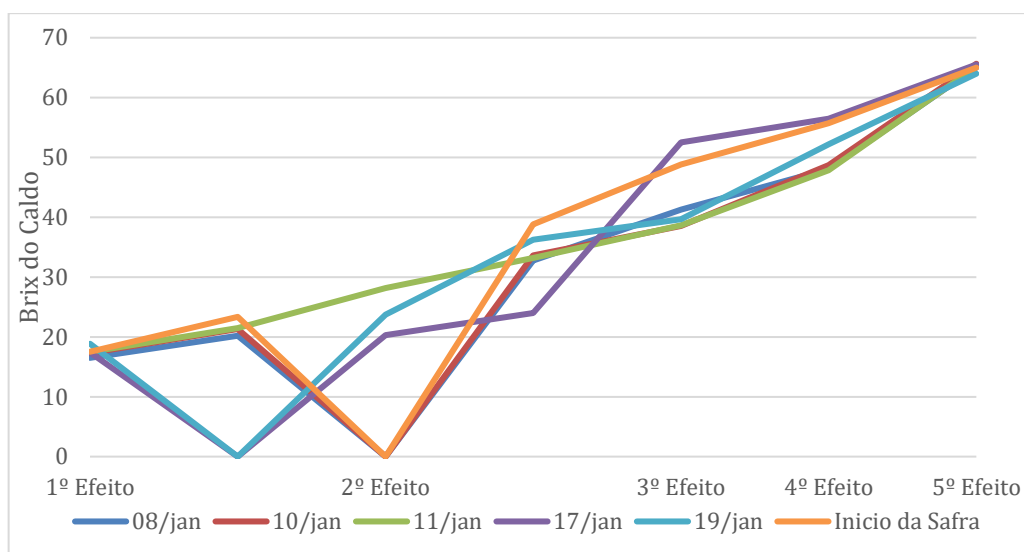


Fonte: Autor (2022)

Conforme apresentado na Figura , à medida que o Brix aumenta, a Taxa de Evaporação Específica (TEE) diminui, obviamente essa explicação é muito lógica, o caldo está sendo concentrado a cada evaporação isso implica dizer que a quantidade de água está sendo menor a cada evaporação e, portanto, menor será o TEE.

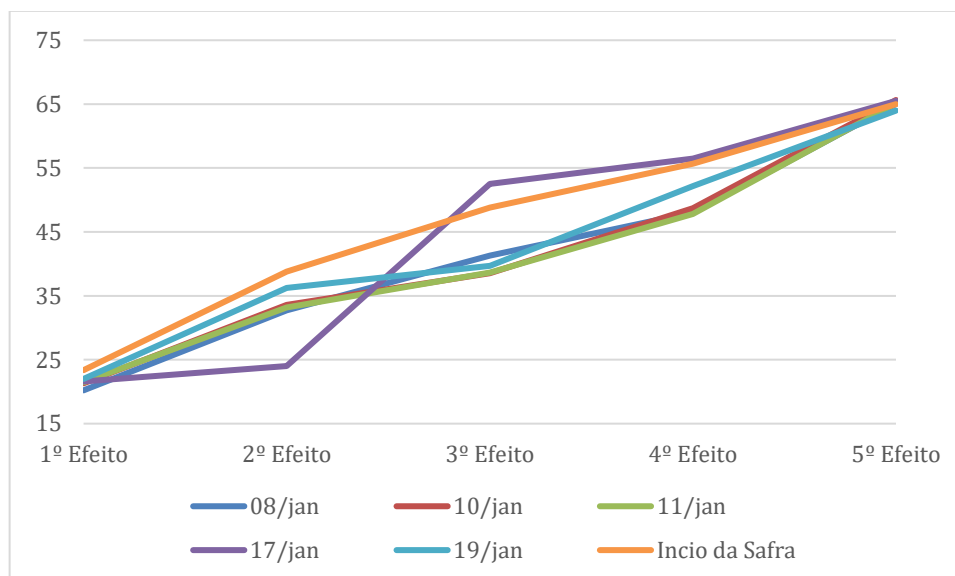
Na Figura 24, tem-se a comparação do Brix no início da safra com o determinado no mês de janeiro, os valores de brix iguais a zero corresponde a possíveis problemas de entupimento durante a coleta do material, mas na Figura 25 é observado que mesmo com a retirada dos valores iguais a zero o processo continua a trabalhar com a mesma eficiência.

Figura 24 - Representa a comparação do Brix do início da safra com as análises coletadas.



Fonte: Autor (2022)

Figura 25 - Representa a comparação do Brix do início da safra com as análises coletadas corrigidas.



Fonte: Autor (2022)

Para comprovar a eficiência dos evaporadores, foram coletadas amostras na saída dos 5 efeitos. O xarope examinado durante cinco dias do mês de janeiro deve possuir os valores de Brix igual ou aproximado ao dos cálculos feitos referente ao início de safra, para isso a coleta foi feita nos dias 8, 10, 11, 17, 19 de janeiro de 2022 em horários aleatórios, totalizando 25 análises das quais os resultados estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Mostra o comportamento do Brix do xarope nas análises realizadas.

Data	Caixa 1A	Caixa 1B	Caixa 2A	Caixa 2B	3º Efeito	4ºEfeito	5ºEfeito
08/jan	16,51	20,21	X	32,75	41,28	48,06	65,03
10/jan	17,3	21,31	X	33,6	38,55	48,69	65,65
11/jan	17,5	21,47	28,15	33,2	38,65	47,83	65,15
17/jan	17,39	X	20,31	24,01	52,53	56,46	65,51
19/jan	18,88	X	23,71	36,23	39,68	52,18	63,99

Fonte: Autor (2022)

Desta forma pode-se comparar os dados obtidos no início da safra com os dados coletados no mês de janeiro por meio da Figura . Como observado na Figura 25, verifica-se que o maior valor obtido foi no dia 10 de janeiro com Brix de 65,65 e os demais dados ficaram oscilando entre 63,99 e 65,51.

Hugot (1977) ressalva que a evaporação, de fato, se estende desde caldo clarificado até xarope e nela se trabalha apenas com um produto líquido.

Segundo Lopes e Parazzi (1992, apud CHAVES, 2015), “o caldo que entra no processo de evaporação possui concentração de 14º a 17º Brix, sendo elevada até valores entre 50º e 70º Brix”.

Hugot (1977) menciona que em uma usina o xarope chega ao último efeito com um Brix em torno de 40º e o deixa com um Brix próximo a 60 ou 65º. Portanto, sua média é de 50 ou 55º Brix.

À vista disso, os resultados obtidos nas análises laboratoriais do mês de janeiro foram equivalentes a análise feita no início da safra dando uma evidência de que a evaporação está adequada.

6 CONCLUSÃO

Comparando os resultados obtidos no início da safra, com os resultados referentes ao mês de janeiro, fica evidente que ambos apresentaram valores de Brix equivalentes, isso prova que os evaporadores da Usina Cucaú do estado de Pernambuco, encontram-se em perfeitas condições de funcionamento, ou seja, com uma eficiência bastante elevada.

Isso ainda prova que problemas como incrustações, mal condições de operação e outros não são identificados, isso devido ao grande controle de qualidade que a usina preza em ter. Os evaporadores são constantemente limpos e muito bem operados, a fim de que os mesmos funcionem dentro dos valores que são tidos como ideais para obtenção de um xarope de Brix 65.

REFERÊNCIAS

- A produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo). **Nova Cana**. 2013. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo>> Acesso em: 06 dez 2021.
- ALVES, V. **Como o açúcar é produzido**. 2019. Disponível em: <<https://blog.tudogostoso.com.br/materia/como-o-acucar-e-produzido/>>. Acesso em: 05/02/2022.
- ARAÚJO, E. C. C. **Evaporadores**. São Carlos: EdUFSCar. 2011.
- BORTOLOTTI, D. B. **Evaporação do Caldo**. 2016. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/evapora%C3%A7%C3%A3o-do-caldo-diogo-brasileiro-bortolotti/>> Acesso em: 06/12/2021.
- BORTOLOTTI, D. B. **Vácuo em um último efeito na evaporação**. 2016. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/v%C3%A1cuo-em-um-%C3%BAltimo-efeito-na-evapora%C3%A7%C3%A3o-diogo-brasileiro-bortolotti/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 03/02/2022.
- CALDAS, C. S. **Escurecimento do açúcar branco: influência do processo e do tempo de armazenamento**. Tese (Doutorado em Nutrição). Universidade Federal de Pernambuco. Recife- PE. 2012.
- CAMPESE, G. B.; PASSINI, R. J. **Estudo de Evaporadores De Múltiplos Efeitos**. v. 3, n. 7, p. 47, 2015.
- CASTRO, S. B.; ANDRADE, S. A. **Engenharia e Tecnologia Açucareira**. 2007.
- CERCA, M. P.; Esparza, R.. **Juice Evaporation**. Making Sugar. 1986.
- CHAVES, T. C. **Avaliação de Desempenho de um Conjunto Evaporador Quíntuplo Efeito Empregado na Produção de Açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió - AL. 2015.
- CORDEIRO JÚNIOR, M. R. **Avaliação da Eficiência dos Evaporadores da Usina Central Olho d'água para Fabricação de Açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Química Industrial). Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande – PB. 2009
- CREMA, L. C. **Clarificação por Flotação com Ar Dissolvido (FAD) da calda de açúcar cristal para produção de açúcar refinado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista. São José do Rio Preto – SP. 2012.

FAVERO, D. M. **Clarificação do caldo de cana-de-açúcar pelo processo de carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2011.

FOUST, A. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 1982.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Volume 2. 1ª ed. São Paulo: Mestre Jou. 1977.

JESUS, C. D. F. **Validação da Simulação Dinâmica das Etapas de Evaporação e Cristalização da Produção de Açúcar**. Tese de doutorado. São Paulo: UFSCar, 2004.

LOPES, C. H., PARAZZI, C. **Introdução à tecnologia de produção de açúcar**. Apostila Técnica. Araras, UFSCar, p. 14-35. 1992.

SANTOS, L. J. C. **Avaliação do Ciclo de Vida e Custeio do Ciclo de Vida de Evaporadores Para Usina de Açúcar**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2007.

SANTOS, D. H. **Efeito residual da adubação de plantio com torta de filtro e fosfato solúvel na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Agronomia). Botucatu, SP: Universidade Estadual de Paulista, 2012.

SILVA, P. R. S. **Simulação Dinâmica e Otimização de Evaporadores de Múltiplos Efeitos em Biorrefinarias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2013.