

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC  
ENGENHARIA QUÍMICA

RAFAEL ANTONIO DE LIMA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS**

Maceió

2020

RAFAEL ANTONIO DE LIMA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Alagoas como requisito para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia  
Química

Orientador: Prof. Dr. Altair Marques da Silva

Maceió

2020

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

L732e Lima, Rafael Antonio de.  
Eficiência energética de evaporadores de múltiplos efeitos / Rafael Antonio de Lima. – 2020.  
47 f. : il. ; figs.

Orientador: Altair Marques da Silva.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) –  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 46-47.

1.Evaporação.2. Evaporadores de múltiplos efeitos. 3. Eficiência energética. I.  
Título.

CDU: 621.3: 621.5.048

RAFAEL ANTONIO DE LIMA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Alagoas como requisito para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia  
Química

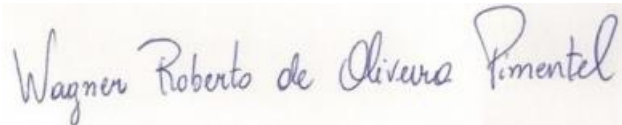
Aprovado em: 25 de agosto de 2020

BANCA EXAMINADORA



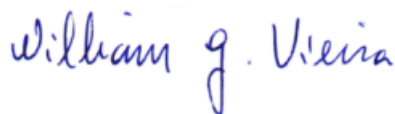
Prof. Dr. Altair Marques da Silva

Universidade Federal de Alagoas



Prof. Dr. Wagner Roberto de Oliveira Pimentel

Universidade Federal de Alagoas



Prof. Dr. William Gonçalves Vieira

Universidade Federal de Alagoas

Dedico ao meu pai, Antônio, por me despertar para os números, e a minha mãe, Cícera (in memoriam), por despertar meu lado mais humano. A minha irmã, Rafaela, e a minha sobrinha, Letícia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o Criador da Vida, por tudo que já fez na minha e por tudo mais que ainda fará. Até aqui me ajudou o Senhor.

Ao professor Wagner Pimentel por todo o suporte, pelo empenho nas atividades que se envolve, pela celeridade, pela incrível disponibilidade, por sanar as dúvidas, pelas recomendações, pela paciência e compreensão.

Ao professor Altair Marques pelo incentivo e confiança.

Aos meus pais Antônio e Cícera (in memoriam) que sempre buscaram proporcionar o melhor para seus filhos: eu e minha irmã Rafaela. E que sempre tiveram a percepção que a educação oriunda dos bancos escolares deveria ser perseguida e alcançada. Muito obrigado!

Rafaela, tê-la como irmã é um presente de inestimável valor.

Aos meus padrinhos, Lima e Alice, pelo acolhimento principalmente na adolescência, e aos meus primos, seus filhos, especialmente a Keka que muito me socorreu precipuamente nas minhas primeiras atividades acadêmicas. Maga você é 10! Para que os demais não fiquem com ciúmes também os citarei: Márcio, Kel e Dinha. Ternamente grato.

À minha madrinha Alice por escutar, em determinados momentos, meus desabafos e com palavras me encorajar a prosseguir na Engenharia Química. Obrigado!

Aos meus padrinhos, Amaro e Ivete, pelos cuidados na infância, e as suas filhas, minhas primas, principalmente a Maura, Marizene e Marizete que me auxiliavam nas minhas tarefas escolares. Também sou grato a Céia e a madrinha Meire.

À Léo e a D. Cícera. Vocês foram e são muito importantes para mim.

Aos vários colegas com os quais estudei e que de inúmeras maneiras em algum período me ajudaram, desde uma palavra de estímulo a horas de estudos juntos se preparando para alguma prova. Algumas memoráveis. Impossível (ou bastante difícil) citar todos e para não ser injusto e esquecer alguns me absterei de elencá-los, mas os preservo e os preservarei nas minhas lembranças.

Aos diversos professores com os quais convivi na graduação e que me enriqueceram imaterialmente de alguma forma.

Ao Jadielson (Jajá) e ao Júnior. Vocês também contribuíram para que eu vivenciasse este instante. Saibam disso.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, cooperaram para que este objetivo fosse atingido e que este ciclo de vida fosse concluído.

“Por tudo dai graças, pois esta é a vontade de Deus a vosso respeito, em Cristo Jesus.”

1 Tes 5,18

“Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito.”

Martin Luther King

“... porque a direção é mais importante que a velocidade.”

Edson Marques

## RESUMO

Evaporação é a remoção do solvente, em forma de vapor, de uma solução. Esta operação ocorre em um equipamento adequado, denominado evaporador, e é utilizada para concentrar uma solução composta por um soluto não volátil e um solvente volátil. A concentração ocorre por meio da ebulição da solução com a retirada do vapor gerado.

A evaporação em múltiplos efeitos é utilizada em inúmeros processos, como, por exemplo, produção de açúcar, leite condensado, sais, etc. O vapor produzido possui uma entalpia elevada que pode ser utilizada, e enviá-la simplesmente para o condensador é um desperdício de energia. Para evitar essa perda e, portanto, para economizar energia, foram desenvolvidos os evaporadores de múltiplos efeitos.

Um evaporador de múltiplos efeitos consiste em vários evaporadores conectados em série, em que o vapor produzido no primeiro efeito é utilizado como vapor de aquecimento no efeito seguinte. O vapor gerado no último efeito vai para um condensador. Provavelmente esta é a operação mais largamente utilizada pela indústria para economia de energia em sistemas de evaporação. Seu princípio consiste em dividir a evaporação em diversos corpos de equipamentos, denominados efeitos ou estágios, utilizando a água evaporada de um efeito como meio de aquecimento do efeito seguinte.

Durante os trabalhos que culminaram na elaboração e apresentação do TCC foi desenvolvido um modelo matemático para o evaporador de múltiplos efeitos devido à necessidade de se obter valores médios de operação e estimativas de parâmetros que possam ser utilizados. O modelo matemático é baseado nos balanços de massa e energia para o conjunto de evaporadores e os mesmos foram resolvidos para determinar as correntes intermediárias do agrupamento de evaporadores. Ademais, foi avaliada a eficiência do sistema e verificado onde estão ocorrendo às perdas no processo.

O programa computacional gerou resultados do vapor servido (S) e dos vapores produzidos em cada evaporador ( $V_i$ ). A partir desses dados encontrou-se um COP, coeficiente de desempenho, de 4,48. Também foram determinados os valores de Brix de cada estágio. O soluto foi sendo concentrado ao passar de estágio em estágio e saiu no quarto efeito com um valor de 65 °Brix, dentro dos padrões esperados pela literatura.

**PALAVRAS CHAVES:** evaporadores; múltiplos efeitos; eficiência energética.



## ABSTRACT

Evaporation is the removal of the solvent, in vapor form, from a solution. This operation occurs in a suitable equipment, called evaporator, and is used to concentrate a solution composed of a non-volatile solute and a volatile solvent. The concentration occurs by boiling the solution with the removal of the generated vapor.

Evaporation in multiple effects is used in numerous processes, for example, sugar production, condensed milk, salts, etc. The steam produced has a high enthalpy that can be used, and simply sending it to the condenser is a waste of energy. To avoid this loss, and therefore to save energy, the multi-effect evaporators have been developed.

A multi-effects evaporator consists of several evaporators connected in series, in which the steam produced in the first effect is used as heating vapor in the following effect. The steam generated in the last effect goes to a condenser. This is probably the most widely used industry operation for energy saving in evaporative systems. Its principle is to divide the evaporation into several bodies of equipment, called effects or stages, using water evaporated from an effect as a means of heating the next effect.

During the work that culminated in the preparation and presentation of the TCC, a mathematical model for the multi-effect evaporator was developed due to the need to obtain average operating values and parameter estimates that can be used. The mathematical model is based on the mass and energy balances for the set of evaporators and they were solved to determine the intermediate currents of the evaporator cluster. In addition, the efficiency of the system was assessed and it was verified where losses are occurring in the process.

The computer program generated results of the steam served ( $S$ ) and the vapors produced in each evaporator ( $V_i$ ). From these data, a COP, performance coefficient, of 4.48 was found. The Brix values of each stage were also determined. The solute was concentrated when passing from stage to stage and came out in the fourth effect with a value of 65 ° Brix, within the standards expected by the literature.

**KEYWORDS:** evaporators; multiple effects; energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evaporador de tubos horizontais .....	18
Figura 2 - Evaporador de tubos verticais curtos, tipo calandra .....	19
Figura 3 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo cesto .....	20
Figura 4 - Evaporador de circulação forçada horizontal .....	21
Figura 5 - Evaporador de circulação forçada vertical com superfície interna .....	22
Figura 6 - Evaporador de tubos verticais longos ou de películas ascendentes .....	23
Figura 7 - Evaporador de película descendente .....	24
Figura 8 - Evaporador de película ascendente-descendente .....	25
Figura 9 - Evaporador a película turbulenta .....	26
Figura 10 - Esquema de um evaporador de placas .....	27
Figura 11 - Esquema de um evaporador simples .....	30
Figura 12 - Sistema de evaporador de quádruplo efeito para alimentação concorrente .....	31
Figura 13 - Esquema do 1º corpo de um sistema de evaporadores quádruplos efeitos com alimentação concorrente .....	33
Figura 14 - Esboço das entradas e saídas imediatamente posteriores ao 1º corpo .....	34
Figura 15 - Esquema do 2º corpo de um sistema de evaporadores quádruplos efeitos com alimentação concorrente .....	36
Figura 16 - Esboço das entradas e saídas imediatamente posteriores ao 2º corpo .....	36
Figura 17 - Esquema do 3º corpo de um sistema de evaporadores quádruplos efeitos com alimentação concorrente .....	37
Figura 18 - Esboço das entradas e saídas imediatamente posteriores ao 3º corpo .....	38
Figura 19 - Esquema do 4º corpo de um sistema de evaporadores quádruplos efeitos com alimentação concorrente .....	39
Figura 20 - Esboço da entrada, saída e vapores gerados no sistema .....	40
Figura 21 - Sistema de evaporadores de quádruplos efeitos para alimentação concorrente ..	40

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados oriundos de uma usina sucroenergética alagoana .....	42
Quadro 2 - Dados oriundos de uma usina sucroenergética acrescidos de outros parâmetros	43
Quadro 3 - Valores gerados pelo programa computacional para a alimentação concorrente	43
Quadro 4 - Valores de Brix para cada evaporador gerado pelo programa computacional .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS

Q	Quantidade de calor trocada por tempo
U	Coefficiente global de troca térmica
A	Área de troca térmica
$\Delta t$	Diferença de temperatura
V	Vazão mássica de vapor produzido no evaporador pela ebulição da solução
$V_i$	Vazão mássica de vapor produzido no evaporador i pela ebulição da solução, onde i varia de 1 a 4
H	Entalpia do vapor saturado alimentado no evaporador
$H_S$	Entalpia do vapor saturado alimentado no evaporador
$H_V$	Entalpia do vapor produzido no evaporador
$H_i$	Entalpia do vapor produzido no evaporador i, onde i varia de 1 a 4
$H_{iS}$	Entalpia do condensado que sai da câmara de vapor de aquecimento i + 1
S	Vazão mássica de vapor de aquecimento
P	Pressão de saturação
$P_i$	Pressão de saturação no evaporador i, onde i varia de 1 a 4
$H_L$	Entalpia do condensado que sai da câmara de vapor de aquecimento
L	Vazão mássica de alimentação da solução diluída
$L_i$	Vazão mássica de solução concentrada produzida no evaporador i, onde i varia de 1 a 4
$h_L$	Entalpia da solução concentrada produzida no evaporador
$h_F$	Entalpia da solução diluída alimentada no evaporador
$h_i$	Entalpia da solução concentrada produzida no evaporador i, onde i varia de 1 a 4
$x_F$	Fração mássica de sólidos na alimentação
X	Fração mássica de sólidos na alimentação
$x_L$	Fração mássica de sólidos na solução concentrada
$x_i$	Fração mássica de sólidos na solução concentrada que sai do evaporador i, onde i varia de 1 a 4
F	Vazão mássica de alimentação da solução diluída
Y	Fração mássica de sólidos no vapor produzido
COP	Coefficiente de desempenho
$T_{\text{caldo}}$	Temperatura do caldo clarificado

$B_{rx_{caldo}}$  Brix do caldo clarificado

B Brix do caldo clarificado

EPE Elevação do ponto de ebulição

$\lambda_i$  Calor de latente de vaporização do caldo clarificado na temperatura de saturação do evaporador i

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
2	<b>OBJETIVOS</b>	16
2.1	Objetivos gerais	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	17
3.1	Evaporação	17
3.2	Tipos de evaporadores	17
3.2.1	Evaporadores de circulação natural	18
3.2.1.1	Evaporadores de tubos horizontais	18
3.2.1.2	Evaporadores de tubos verticais tipo calandra, padrão ou Roberts	19
3.2.1.3	Evaporador de tubos verticais tipo cesto	20
3.2.2	Evaporadores de circulação forçada	20
3.2.2.1	Evaporador de circulação forçada horizontal	21
3.2.2.2	Evaporador de circulação forçada vertical	21
3.2.3	Evaporadores de película	22
3.2.3.1	Evaporador de película ascendente	22
3.2.3.2	Evaporador de película descendente	23
3.2.3.3	Evaporador de película ascendente-descendente	24
3.2.3.4	Evaporador a película turbulenta	25
3.2.3.5	Evaporadores de placas	26
3.3	Evaporadores de múltiplos efeitos	27
3.4	Limites na evaporação	28
3.5	Modelagem geral de um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos	28
3.6	Balanços de massa e energia	29
3.7	Métodos de alimentação	30
3.8	Coefficiente de desempenho	31
3.9	Estimativa para o coeficiente de troca térmica	31
3.10	Elevação do Ponto de Ebulição	32
4	<b>METODOLOGIA</b>	33
4.1	Efeito 1	33
4.2	Efeito 2	35
4.3	Efeito 3	37

4.4	Efeito 4 .....	38
5	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	43
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	45
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, cultivada em mais de 100 países. Apesar desta difusão mundial, cerca de 80% da produção do planeta está concentrada em dez países. (NOVACANA, 2019) O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro. (CONAB, 2018, p.10)

O Estado de São Paulo é onde se concentra a maior parte das usinas e as maiores áreas de plantio de cana-de-açúcar. É também o maior produtor nacional, responsável por quase 60% da cana-de-açúcar brasileira. (SILVA, 2012)

Em termos regionais, o Brasil apresenta dois períodos distintos de safra: de setembro a março no Norte-Nordeste, e de abril a novembro no Centro-Sul. (NOVACANA, 2019) Alagoas destaca-se na agricultura como o maior produtor de cana-de-açúcar do Nordeste. (BARROS, 2018)

No Brasil, todo o açúcar é produzido através da cana de açúcar. Uma das etapas dessa produção na fábrica de açúcar é a evaporação do caldo. A evaporação tem como objetivo eliminar a água presente no caldo clarificado a fim de que o açúcar se concentre até a formação de cristais. (BORTOLOTTI, 2016)

Evaporação é a remoção do solvente, em forma de vapor, de uma solução. Esta operação ocorre em um equipamento adequado, denominado evaporador, e é utilizada para concentrar uma solução composta por um soluto não volátil e um solvente volátil. A concentração ocorre por meio da ebulição da solução com a retirada do vapor gerado. Na maioria das aplicações o solvente é a água, o soluto é um sólido com pressão de vapor muito baixa e o produto que se pretende obter é a solução concentrada. Porém, em algumas situações, o produto principal é o vapor gerado, e não a solução concentrada. (ARAÚJO, 2011)

A evaporação é considerada dentre todas as operações que envolvem a fabricação de açúcar e álcool, a etapa que possibilita os principais ganhos em eficiência energética. “É o coração do balanço energético. Com um bom trabalho nesta operação, a usina consegue obter mais energia e ficar mais competitiva”, completa Piza. (REVISTA ALCOOLBRAS, 2006)

A etapa de evaporação tem grande influência no balanço energético da usina e a qualidade do xarope obtido nesse processo tem impacto no desempenho e no consumo de energia de etapas posteriores. A etapa de evaporação tem grande peso 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, utilizados por



outros equipamentos da usina. Esta operação ocorre em um equipamento adequado denominado evaporador. (ALBUQUERQUE, 2014)

Evaporadores são equipamentos de troca térmica que possuem a função de concentrar soluções diluídas conforme a necessidade do processo. São encontrados de diferentes formas e tamanhos, e podem ser classificados como evaporadores de simples ou de múltiplos efeitos. Para se ter uma melhor eficiência energética na usina é necessário ter evaporadores de múltiplos efeitos, ao invés de simples efeito. (GUIMARÃES, 2018)

Um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos consiste em vários evaporadores conectados em série, em que o vapor produzido no primeiro efeito é utilizado como vapor de aquecimento no efeito seguinte. O vapor gerado no último efeito vai para um condensador. (ARAÚJO, 2011)

Durante o estudo de evaporadores de múltiplos efeitos faz-se necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos e estes são baseados nos balanços de massa e energia para o conjunto de evaporadores e os mesmos são resolvidos para determinar as correntes intermediárias do agrupamento de evaporadores. Também são avaliadas as eficiências de cada evaporador e em todo o sistema. (CHAVES, 2015)

Na modelagem de evaporadores de múltiplos efeitos, valor de pressão e de temperatura é ajustado para cada evaporador. As entalpias necessárias para estes valores de pressão são encontradas a partir de tabelas termodinâmicas e diagramas. Os balanços de massa, de componentes e de energia são fornecidos para cada evaporador e também para o sistema. Estes balanços são transformados em equações linearmente independentes depois das hipóteses necessárias. Estas equações são geralmente uma função da quantidade de vapor inicial e da quantidade de vapor de solução formada em cada evaporador. As equações lineares obtidas são resolvidas diretamente ou com o método iterativo. (KAYA E SARAC, 2004)

Existem alguns métodos de alimentação sendo que o utilizado nas usinas de açúcar é o concorrente. Ele é indicado no caso de alimentação quente e que tem solutos termosensíveis; a mesma não necessita de bombas para deslocar a solução de um estágio para outro, em contrapartida efetua todo aquecimento de carga no primeiro efeito, de modo que a quantidade de vapor gerada pelo vapor de água de aquecimento é menor e a solução mais concentrada está sujeita à temperatura mais baixa. (GEANKOPLIS, 1998)

## **2 OBJETIVOS**

### 2.1 Objetivos gerais

Estudar a eficiência energética de um sistema de evaporação de múltiplos efeitos, visando aplicação em uma unidade sucroenergética real. Para tal finalidade serão realizados balanços de massa e energia necessários para a avaliação da eficiência energética.

### 2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver balanços de massa e energia para o conjunto de evaporadores de múltiplos efeitos;
- Resolver os balanços de massa e energia para determinar as correntes intermediárias do conjunto de evaporadores;
- Avaliar a eficiência do sistema de evaporação;
- Comparar os resultados obtidos com o que é descrito na literatura.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Evaporação

Brasil (2004) afirma que evaporação é a operação utilizada nas indústrias para remover solventes de uma solução líquida, através de aquecimento da solução e/ou diminuição da pressão.

Esta operação ocorre em um equipamento adequado, denominado evaporador, e é utilizada para concentrar uma solução composta por um soluto não-volátil e um solvente volátil. A concentração ocorre por meio da ebulição da solução com a retirada do vapor gerado. (ARAÚJO, 2011)

Para que a evaporação ocorra deverá ser fornecido o calor latente para a vaporização do solvente. No evaporador há um fluido frio que recebe calor, entra em ebulição, gera vapor e se concentra, e um outro fluido quente que fornece calor. Se esse fluido quente for vapor d'água saturado, e na maioria das aplicações industriais é isto que ocorre, ele se condensará saindo, então, líquido. O fornecimento de calor é indireto, isto é, a troca ocorre através de uma parede quase sempre metálica. (ARAÚJO, 2011)

Ainda de acordo com Araújo (2011) todos os evaporadores apresentam em comum uma superfície de aquecimento para a troca de calor e um espaço para que o vapor gerado seja separado da solução em ebulição. E a eles se aplica a fórmula (1).

$$q = U A \Delta t \quad (1)$$

Em que  $q$  é a quantidade de calor trocada por tempo,  $U$  é o coeficiente global de troca térmica,  $A$  é a área de troca térmica e  $\Delta t$  é a diferença de temperatura.

#### 3.2 Tipos de evaporadores

Foust (1982) acredita que a diversidade de evaporadores é oriunda da existência de operações que são realizadas com soluções diferentes e em condições econômicas distintas. A variedade de projetos de evaporadores e seus aperfeiçoamentos são para lidar da melhor maneira possível com problemas como corrosão, incrustação, espumas, sensibilidade ao calor e limitações de espaço.

Na perspectiva de Coulson e Richardson (1981, apud, ARAÚJO, 2011, p. 11) os evaporadores podem ser divididos em três classes:

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

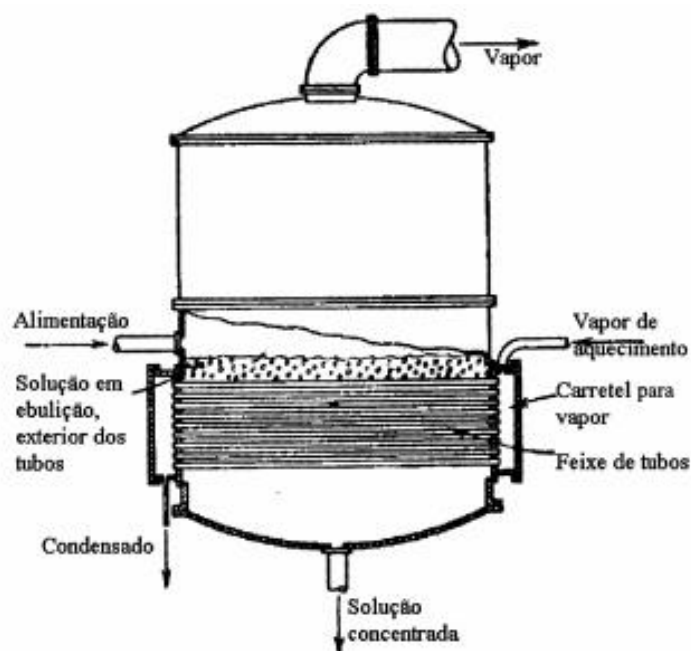
### 3.2.1 Evaporadores de circulação natural

Esta categoria se subdivide em evaporadores de tubos horizontais e em evaporadores de tubos verticais.

#### 3.2.1.1 Evaporadores de tubos horizontais

De acordo com Foust (1982) os evaporadores horizontais por muito tempo foram bastante usados. O grande diferencial deles em relação ao demais é que a solução está na parte externa dos tubos enquanto o vapor está na parte interna. Devido à disposição dos tubos a circulação natural do líquido é alterada diminuindo dessa maneira a sua agitação (Figura 1). Isso faz com que o coeficiente global de transmissão de calor desses evaporadores seja menor que dos outros.

**Figura 1 - Evaporador de tubos horizontais**



Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.1.2 Evaporadores de tubos verticais tipo calandra, padrão ou Roberts

Conforme Araújo (2011), evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra, padrão ou Roberts, é um dos evaporadores mais antigos ainda em funcionamento, usado principalmente na indústria sucroalcooleira para concentrar caldo de cana na produção de açúcar.

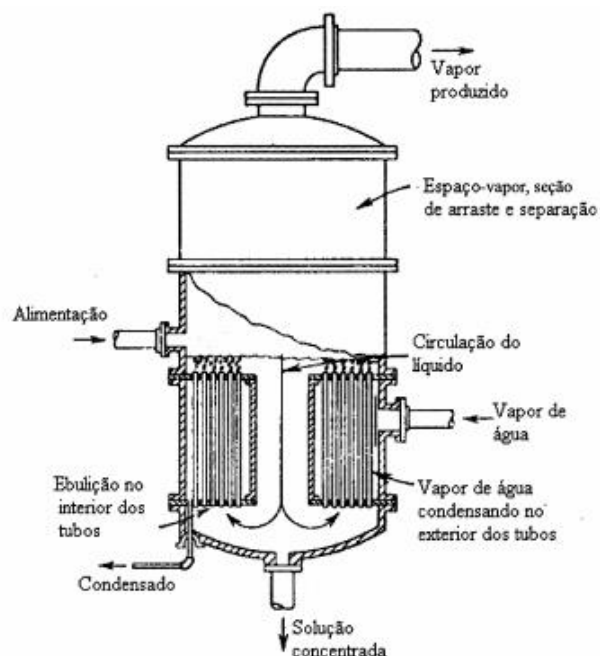
O evaporador tipo Robert's é o mais utilizado nas indústrias açucareiras devido a sua área de aquecimento (CRIVELLARO, PEREIRA E FREITAS, 2016).

No evaporador tipo Robert, há um feixe de tubos verticais em seu interior por onde escoo o caldo de maneira ascendente e no centro do evaporador há um tubo central de maior diâmetro que os demais por onde escoo 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)

Ainda segundo Araújo (2011), ele pode ser usado tanto na circulação natural, caso em que o líquido é pouco viscoso, e na circulação forçada quando o líquido é muito viscoso, neste último caso pode-se ter o auxílio de um impelidor ou rotor para que a movimentação da solução ocorra.

A calandra serve como aparelho de intercâmbio da temperatura: o vapor de aquecimento envolve os tubos externamente e o caldo a ser evaporado está no interior dos tubos. (HUGOT, 1977) O esquema de um evaporador tipo calandra está na Figura 2.

**Figura 2 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra**



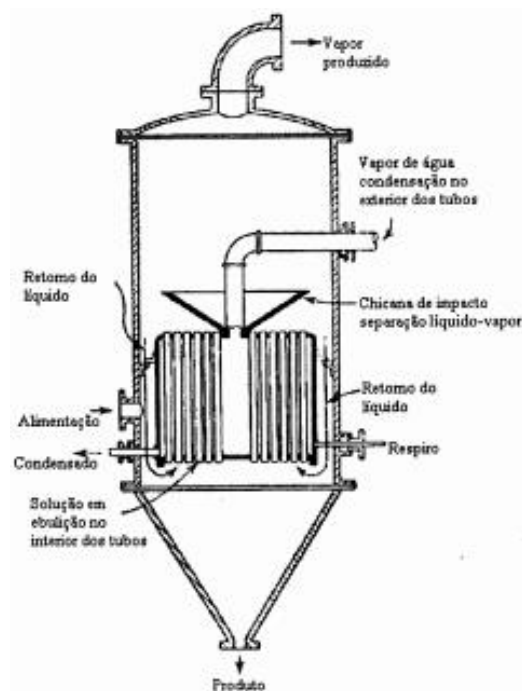
Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.1.3 Evaporador de tubos verticais tipo cesto

Este tipo de evaporador é semelhante ao tipo calandra, possuindo as mesmas características e aplicações, exceto com relação ao canal de retorno que não é central. O elemento aquecedor é retirado facilmente e não representa problemas de expansão diferencial. (ARAÚJO, 2011)

O evaporador de tubos verticais curtos tipo cesto é exibido na figura 3.

**Figura 3 - Evaporador de tubos verticais curtos tipo cesto**



Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.2 Evaporadores de circulação forçada

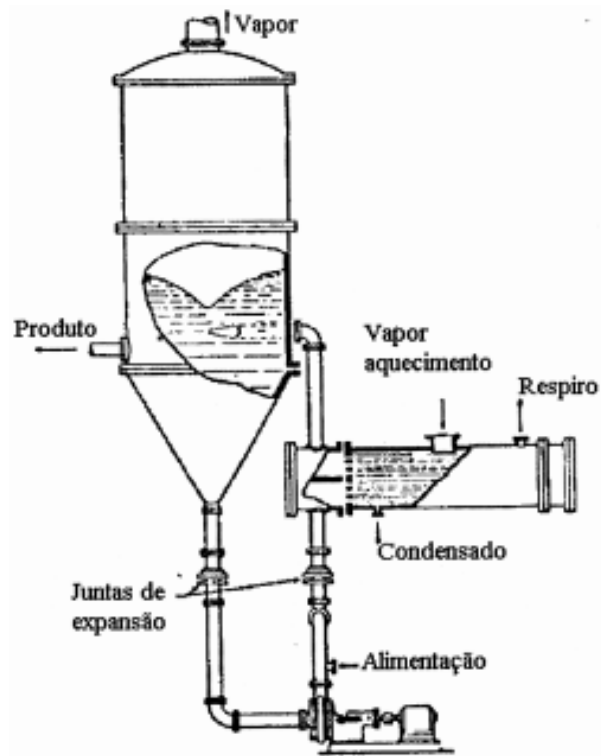
Nestes evaporadores, o líquido evaporante é bombeado através de um trocador de calor onde o meio calefator circunda os tubos portadores da solução. A perda de pressão e a pressão hidrostática, combinadas, são muitas vezes bastante grandes para impedir a ebulição da solução nos tubos trocadores, e por isso o vapor gerado forma-se instantaneamente quando o líquido entra na câmara de vaporização. Uma vez que a velocidade da mistura evaporada é alta, são importantes as chicanas anti-respingos para minimizar o arrastamento. (FOUST, 1982)

### 3.2.2.1 Evaporador de circulação forçada horizontal

Araújo (2011) afirma que quando a superfície de permuta de calor é horizontal externa o evaporador é mais compacto e a superfície externa torna a limpeza e conservação mais simples.

O evaporador de circulação forçada horizontal é exposto na Figura 4.

**Figura 4 - Evaporador de circulação forçada horizontal**



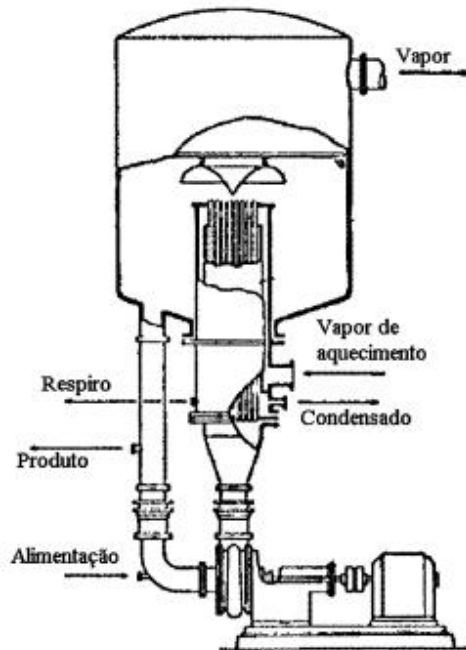
Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.2.2 Evaporador de circulação forçada vertical

Se o elemento de aquecimento for vertical, normalmente é utilizada uma passagem no lado do tubo, se for horizontal, utilizam-se duas passagens. (ARAÚJO, 2011)

O referido evaporador deste tópico é revelado na Figura 5.

Figura 5 - Evaporador de circulação forçada vertical com superfície interna



Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.3 Evaporadores de película

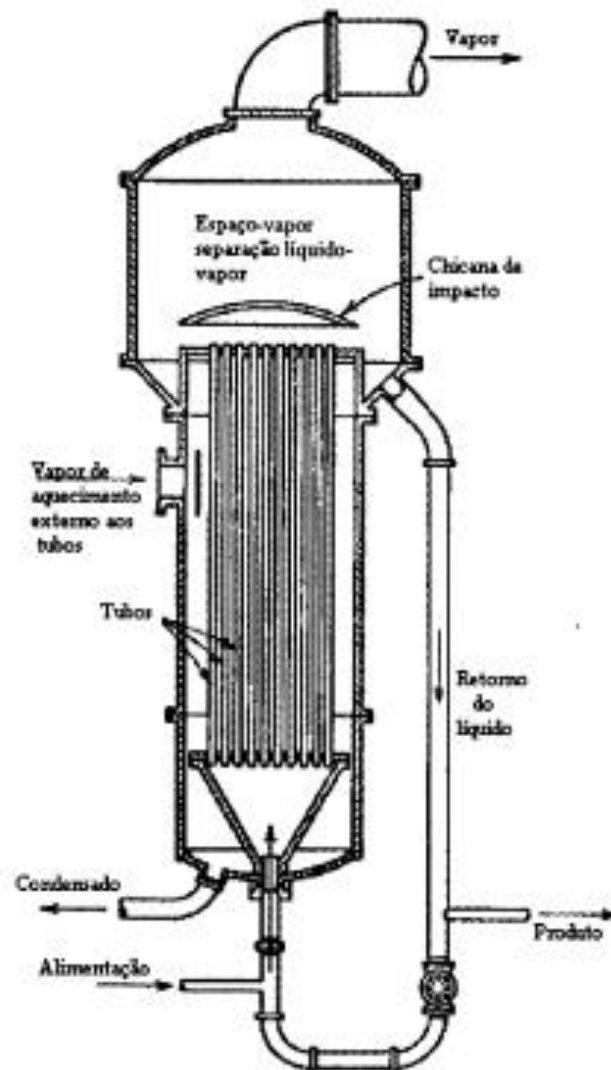
Logo abaixo são apresentados alguns evaporadores de película subdivididos em: evaporador de película ascendente, evaporador de película descendente, evaporador de película ascendente-descendente, evaporador a película turbulenta e evaporadores de placas.

#### 3.2.3.1 Evaporador de película ascendente

Segundo Araújo (2011), o primeiro evaporador mencionado na subdivisão imediatamente acima é um dos mais encontrados na indústria e em muitos livros ele é considerado como de circulação natural. Seu uso permite que a solução fique apenas alguns segundos nele evitando assim a decomposição ou mesmo alterações térmicas de algumas substâncias. Seu comprimento varia de 3,5m a 11m enquanto que o diâmetro vai de 19 mm a 50 mm. São equipamentos que impedem o arraste de espuma, portanto podem ser usados com soluções que tendem a formar espumas. O evaporador de película ascendente é retratado na Figura 6.



Figura 6 - Evaporador de tubos verticais longos ou de películas ascendentes

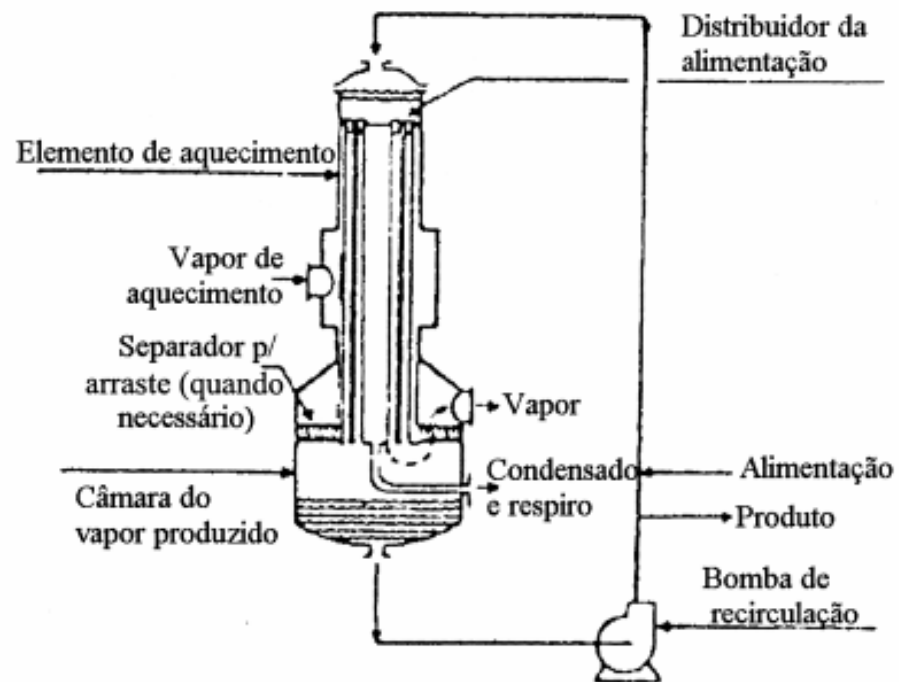


Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.3.2 Evaporador de película descendente

Foust (1982) declara que o evaporador de película descendente é um dispositivo adequado para soluções termicamente sensíveis. Nele o fluido é infiltrado no topo de tubos compridos, verticais, de diâmetros elevados (5,08 cm a 10,16 cm), paralelamente ao gás de evaporação. O tempo de contato é pequeno. Tal evaporador é reproduzido na Figura 7.

Figura 7 - Evaporador de película descendente

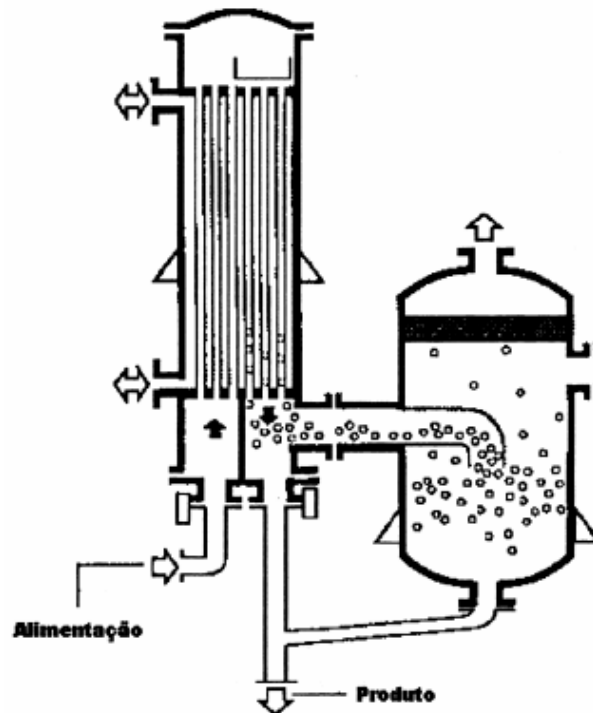


Fonte: Araújo, 2011.

### 3.2.3.3 Evaporador de película ascendente-descendente

Conforme Araújo (2011), da junção dos dois evaporadores citados anteriormente surgiu o evaporador de película ascendente-descendente, um dispositivo com tubulações menores em relação aos modelos que inspiraram sua criação. Da mesma maneira que o evaporador de película ascendente ele também tem a característica de apresentar facilidade de distribuição da alimentação. Na Figura 8 o evaporador de película ascendente-descendente é apresentado.

Figura 8 - Evaporador de película ascendente-descendente

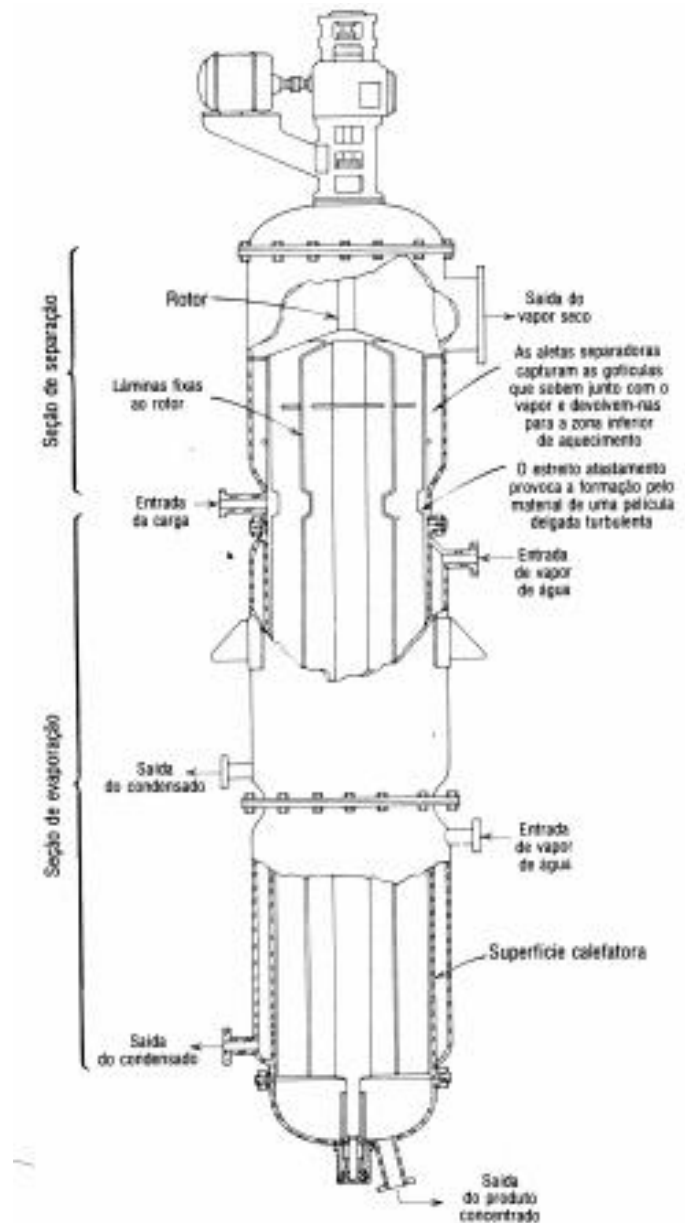


Fonte: Araújo, 2011.

#### 3.2.3.4 Evaporador a película turbulenta

Ao dissertar sobre evaporação, Foust (1982) também faz referência ao evaporador a película turbulenta. Equipamento adequado para atuar com líquidos viscosos. Além de operar com tempo de residência pequeno do fluido no evaporador. Ele é esquematizado na Figura 9.

Figura 9 - Evaporador a película turbulenta

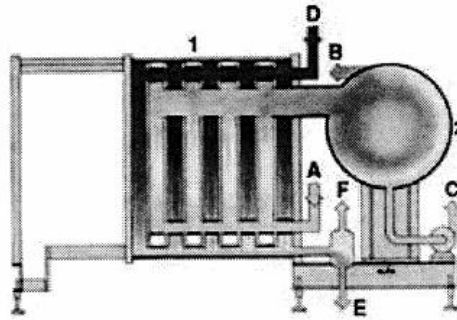


Fonte: Foust, 1982.

### 3.2.3.5 Evaporadores de placas

Evaporadores de placas são equipamentos compactos, com o separador conectado ao conjunto de placas, ocupam pequeno espaço e a altura é inferior a 4 m. São versáteis, a superfície de troca pode ser facilmente inspecionada e alterada. 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) Na Figura 10 tem-se o desenho de um evaporador de placas.

Figura 10 - Esquema de um evaporador de placas



A - alimentação a ser concentrada; B - vapor gerado; C - produto concentrado; D - vapor de aquecimento; E - condensado; 1 - calandra; 2 - separador.

Fonte: Araújo, 2011.

### 3.3 Evaporadores de múltiplos efeitos

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

Araújo (2011) relata que esse sistema é utilizado para a fabricação de inúmeros produtos, além do mencionado no parágrafo imediatamente anterior, ele cita leite condensado e sais como exemplo. Ele também comenta que o vapor que é produzido tem um valor de entalpia alto e enviá-lo diretamente para o condensador seria um grande desperdício de energia. Para minimizar esta perda, e desta maneira economizar energia, ele é redirecionado para outro evaporador que é enviado para o seguinte, num sistema designado de evaporadores de múltiplos efeitos.

Provavelmente esta é a operação mais largamente utilizada pela indústria para economia de energia em sistemas de evaporação. Seu princípio consiste em dividir a evaporação em diversos corpos de equipamentos, denominados efeitos ou estágios, utilizando a água evaporada de um efeito como meio de aquecimento do efeito seguinte. (ALBUQUERQUE, 2014)

Um estágio pode ser definido como uma unidade de equipamento onde entram em contato íntimo duas fases diferentes, que são depois separadas mecanicamente. Durante o contato, diversos componentes difusíveis da mistura se redistribuem entre as fases. (FOUST, 1982)

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-á 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.

Vácuo é usado 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, 2013)

### 3.4 Limites na evaporação

Jesus (2004) avalia que o caldo clarificado possui aproximadamente 85% de água. Após evaporar passa a ter mais ou menos 40% de água, transformando-se num xarope espesso e amarelado.

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

O caldo que sai da etapa de extração e passa pela etapa de tratamento apresenta grande quantidade de água e concentração de 14 a 17 BRIX (percentagem em peso de sólidos solúveis na solução). Na prática, pela evaporação da água poder-se-ia obter caldos com até 75 Brix sem que houvesse formação de cristais. (LOPES E PARAZZI, 1992 apud JESUS, 2004, p.8)

Ainda segundo Hugot (1977), na produção do açúcar demerara, o xarope deve ficar entre 60 a 70° Brix, enquanto que na fabricação do açúcar branco a variação é de 50 a 60° Brix.

### 3.5 Modelagem geral de um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos

Na modelagem de evaporadores de múltiplos efeitos, valor de pressão e de temperatura é ajustado para cada evaporador. As entalpias necessárias para estes valores de pressão são encontradas a partir de tabelas termodinâmicas e diagramas. Os balanços de massa, de componentes e de energia são fornecidos para cada evaporador e também para o sistema. Estes balanços são transformados em equações linearmente independentes depois das hipóteses necessárias. Em um sistema que tem  $N$  evaporadores,  $N + 1$  equações lineares são obtidas. Estas equações são geralmente uma função da quantidade de vapor inicial e da quantidade de vapor de solução formada em cada evaporador. As equações lineares obtidas são resolvidas diretamente ou com o método iterativo. (KAYA E SARAC, 2004)

Para elaboração de balanços de massa e energia em sistemas de evaporação, as propriedades físicas mais importantes a serem consideradas são a entalpia e a temperatura de ebulição da solução sendo concentrada. Além disto, propriedades termodinâmicas da água pura são necessárias por se tratar do solvente volátil e também do meio de aquecimento. (WESTPHALEN, 1999)

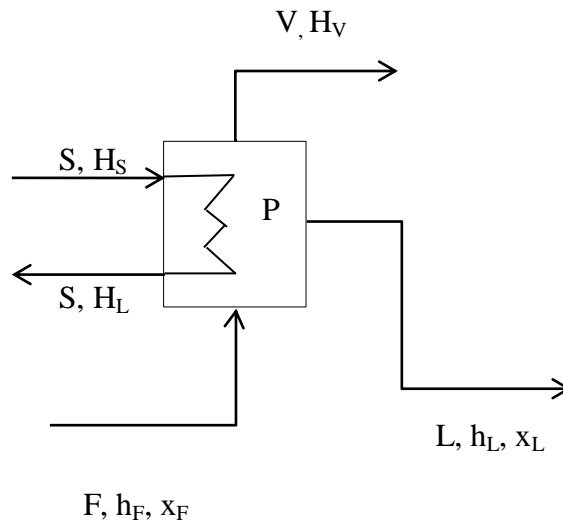
Durante o estudo de evaporadores de múltiplos efeitos faz-se necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos devido à necessidade de se obter valores médios de operação e estimativas de parâmetros que possam ser utilizados. O modelo matemático é baseado nos balanços de massa e energia para o conjunto de evaporadores e os mesmos são resolvidos para determinar as correntes intermediárias do agrupamento de evaporadores. Também são avaliadas as eficiências de cada evaporador e em todo o sistema. (CHAVES, 2015)

A numeração dos efeitos, por convenção, é feita a partir do efeito onde entra o vapor de aquecimento e no sentido do caminho do vapor. Nas unidades de evaporação, normalmente o maior custo é referente ao vapor de aquecimento, por isso a necessidade de um melhor aproveitamento de vapor. Na indústria que emprega evaporadores, o método mais comum para economizar energia é utilizando os evaporadores de múltiplos efeitos. É muito comum encontrar evaporadores de dois, três, quatro e cinco efeitos. (ARAÚJO, 2011)

### 3.6 Balanços de massa e energia

Para um evaporador simples, ou seja, um evaporador que tem apenas um corpo serão apresentados os balanços concebidos a partir dele. Na Figura 11 tem-se a sua representação.

**Figura 11 - Esquema de um evaporador simples**



**Fonte: Autor, 2019.**

O balanço de massa global, considerando-se a alimentação da solução diluída, a solução concentrada e o vapor produzido, será dado pela seguinte equação:

$$F=L+V \quad (2)$$

O balanço de massa por componente será representado pela fórmula logo abaixo:

$$F.x_F=L.x_L \quad (3)$$

O balanço de energia, ponderando o vapor de aquecimento, a alimentação da solução diluída, a solução concentrada, o vapor produzido e suas respectivas entalpias terá a seguinte representação:

$$F.h_F+S.H_S=S.H_L+V.H_V+L.h_L \quad (4)$$

### 3.7 Métodos de alimentação

Kaya e Sarac (2004) reportam três métodos de alimentação: concorrente, contracorrente e paralelo.

Na alimentação concorrente a solução diluída é bombeada para o primeiro efeito do evaporador, passa em seguida por todos os efeitos e sai concentrada no último efeito. A solução percorre o evaporador no sentido da diminuição de pressão e temperatura e sua concentração vai aumentando de efeito para efeito. (ARAÚJO, 2011)

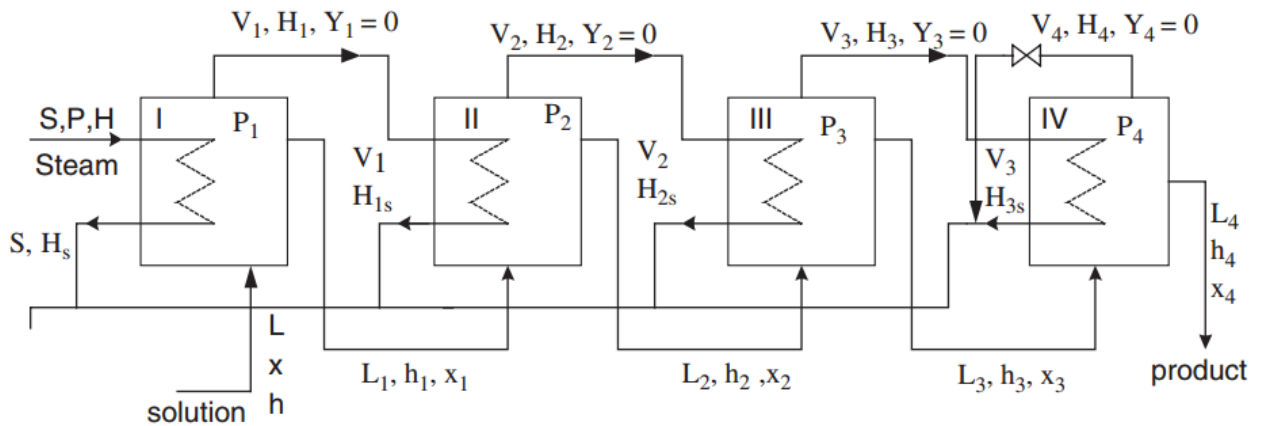
A alimentação concorrente é vantajosa quando a solução alimentada no primeiro efeito está quente, quando a solução concentrada a ser produzida tem limitação de temperatura, ou



ainda, quando a solução se torna mais sensível à temperatura com o aumento da concentração. (ARAÚJO, 2011)

A representação de uma alimentação concorrente em um evaporador de múltiplos efeitos é indicada na Figura 12.

**Figura 12 - Sistema de evaporador de quádruplo efeito para alimentação concorrente**



Fonte: Kaya e Sarac, 2004.

### 3.8 Coeficiente de desempenho

O COP, coeficiente de desempenho, é um parâmetro utilizado para avaliar a eficiência energética de um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos. Kaya e Sarac (2004) atestaram que a alimentação em contracorrente com pré-aquecimento apresenta os valores mais elevados de COP. No entanto, para evitar a degradação do açúcar, a configuração tradicionalmente utilizada nas unidades sucroenergéticas é a concorrente.

O coeficiente de desempenho é definido pela equação abaixo:

$$\text{COP} = \frac{\sum v_i}{s} \quad (5)$$

Onde  $v_i$  representa os vapores que são produzidos em cada efeito e  $s$  denota o vapor de aquecimento produzido numa caldeira e transmitido para o sistema.

### 3.9 Estimativas para o coeficiente de troca térmica

No site [www.sugartech.com](http://www.sugartech.com), especializado em tecnologia do açúcar, é sugerida a seguinte equação para estimar o coeficiente de troca térmica de evaporadores (Van der Poel e colaboradores, cap.11- 1ª edição):

$$U_1 = 0,465 \frac{T_{\text{caldo}}}{\text{Brx}_{\text{caldo}}} \quad (6)$$

Onde  $U_1$  é dado em kW/m<sup>2</sup>°C.

Convertendo as unidades para aquelas empregadas neste trabalho, tem-se: (JESUS, 2004)

$$U_2 = 1674 \frac{T_{\text{caldo}}}{\text{Brx}_{\text{caldo}}} \quad (7)$$

Dessa maneira tem-se  $U_2$  em kJ/m<sup>2</sup>h°C.

### 3.10 Elevação do Ponto de Ebulição

Num múltiplo efeito de usina não é água, mas o caldo que ferve. Ora, a temperatura de ebulição dum solução de açúcar na água, ou caldo sob uma pressão dada, aumenta com a concentração desta solução ou o Brix deste caldo. Sob a pressão atmosférica, o caldo misto ferve 100,3 °C, em vez de 100 °C. Para as purezas elevadas, a elevação do ponto de ebulição é de cerca de (HUGOT, 1977):

$$\text{EPE} = \frac{2B}{1-B} \quad (8)$$

## 4 METODOLOGIA

O método utilizado consiste inicialmente no desenvolvimento dos balanços para cada evaporador de um sistema de múltiplos evaporadores.

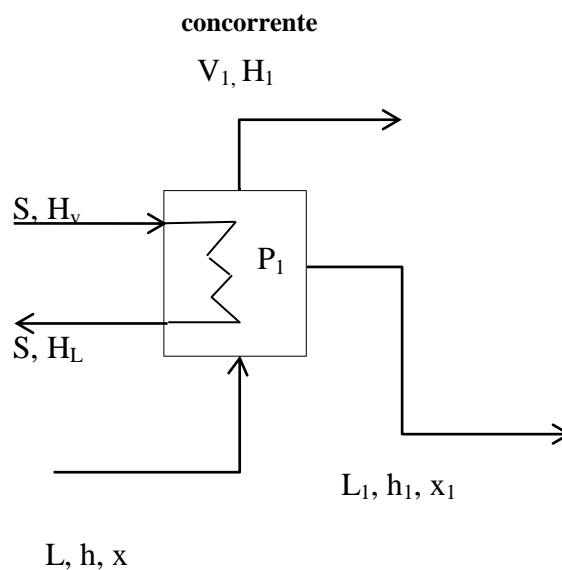
Kaya e Sarac (2004) estudaram um sistema de quatro efeitos com diferentes configurações entre as caixas dos evaporadores. Este trabalho serviu de base para o presente trabalho, o qual trabalhou com o mesmo número de efeitos considerando apenas a configuração de alimentação concorrente com o vapor de aquecimento. Este tipo de configuração foi usada neste trabalho pelo fato de ser a empregada nas usinas sucroalcooleiras.

Para o primeiro corpo, ver Figura 13, são apresentados os sentidos dos deslocamentos das soluções e dos vapores. Constam também os parâmetros envolvidos nos balanços de massa e energia para este sistema.

### 4.1 Efeito 1

Logo abaixo na Figura 13 é refletido o primeiro efeito com alimentação concorrente de um sistema de múltiplos evaporadores.

**Figura 13 - Esquema do 1º corpo de um sistema de evaporadores quádruplos efeitos com alimentação concorrente**



Fonte: Autor, 2019.

No esquema do 1º corpo  $L$ ,  $L_1$ ,  $S$  e  $V_1$  são vazões mássicas dadas em kg/h. Pormenorizadamente,  $L$  é a vazão mássica de alimentação da solução diluída ou a vazão do caldo clarificado,  $L_1$  é a vazão mássica de solução concentrada produzida no primeiro evaporador,  $S$  é a vazão mássica de vapor de aquecimento e  $V_1$  é a vazão mássica de vapor produzido no primeiro evaporador pela ebulição da solução.

As entalpias são representadas por  $h$ ,  $h_1$ ,  $H_v$ ,  $H_L$  e  $H_1$ . Onde  $h$  é a entalpia da solução diluída alimentada no evaporador,  $h_1$  é a entalpia da solução concentrada produzida no primeiro evaporador,  $H_v$  é a entalpia do vapor saturado alimentado no evaporador,  $H_L$  é a entalpia do condensado (água líquida) que sai da câmara de vapor de aquecimento e  $H_1$  é a entalpia do vapor produzido no primeiro evaporador.

$P_1$  é a pressão no primeiro evaporador,  $x$  é a fração mássica de sólidos na alimentação do primeiro evaporador e  $x_1$  é a fração mássica de sólidos na solução concentrada do primeiro evaporador.

A etapa seguinte é o desenvolvimento dos balanços de massa global e por componente que são redigidos a posteriori.

O balanço de massa global é apresentado logo abaixo na equação (9).

$$L = V_1 + L_1 \quad (9)$$

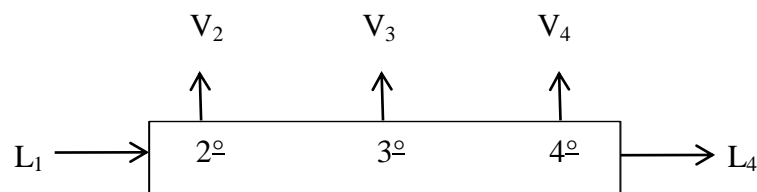
Na equação (10) tem-se o balanço de massa por componente.

$$L \cdot x = L_1 \cdot x_1 \quad (10)$$

De acordo com Araújo (2011) no balanço de massa por componente é desejável que a fração mássica de sólidos no vapor produzido seja sempre igual a zero (0) e não deve ocorrer arraste de sólido ou solução com o vapor.

A próxima ilustração, ou seja, a Figura 14, permite uma melhor visualização dos estágios que a solução concentrada no primeiro corpo terá que percorrer e também os balanços de massas decorrentes desta fase.

**Figura 14 - Esboço das entradas e saídas imediatamente posteriores ao 1º corpo**



Fonte: Autor, 2019.

Na figura 14,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$  representam as vazões mássicas de vapores produzidos nos evaporadores 2, 3 e 4 pela ebulição da solução, respectivamente.  $L_4$  é a vazão mássica da solução concentrada produzida no quarto evaporador.

Balanços de massa

$$L_1 = V_2 + V_3 + V_4 + L_4 \quad (11)$$

$$L_4 \cdot x_4 = L_1 \cdot x_1 \quad (12)$$

$$L \cdot x = L_1 \cdot x_1 \quad (13)$$

$$L_4 \cdot x_4 = L \cdot x \quad (14)$$

$$L_4 = L \cdot x / x_4 \quad (15)$$

$$L_1 = V_2 + V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (16)$$

$$L = V_1 + L_1 \quad (17)$$

$$L = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (18)$$

Para concluir os estudos acerca dos balanços do primeiro evaporador é deduzido o de energia.

Balanco de energia

$$S \cdot H_v + L \cdot h = S \cdot H_L + V_1 \cdot H_1 + L_1 \cdot h_1 \quad (19)$$

$$S \cdot (H_v - H_L) = V_1 \cdot H_1 + L_1 \cdot h_1 - L \cdot h \quad (20)$$

$$H_v - H_L = \lambda_1 \quad (21)$$

Onde  $\lambda_1$  é o calor latente de vaporização no primeiro evaporador.

$$S \cdot \lambda_1 = V_1 \cdot H_1 + (V_2 + V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4) \cdot h_1 - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4) \cdot h \quad (22)$$

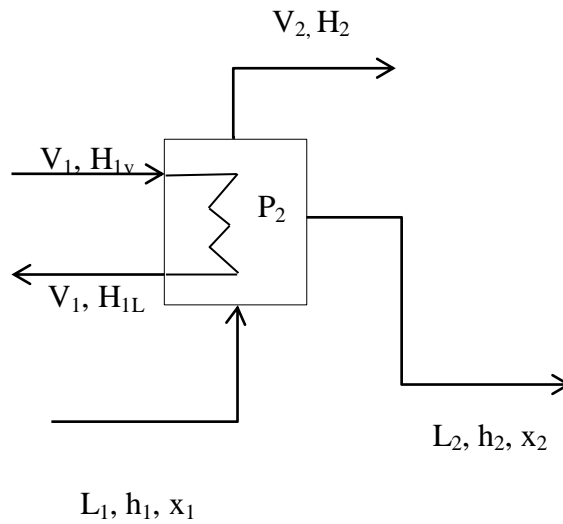
$$S \cdot \lambda_1 + V_1 \cdot (h - H_1) + V_2 \cdot (h - h_1) + V_3 \cdot (h - h_1) + V_4 \cdot (h - h_1) = (h_1 - h) \cdot L \cdot (x / x_4) \quad (23)$$

Os balanços efetuados para o primeiro corpo serão realizados para os demais e referidos nas próximas páginas.

## 4.2 Efeito 2

De maneira análoga a realizada com o Efeito 1 será feito com o segundo estágio. Os parâmetros são os mesmos, são necessários apenas alguns ajustes. O efeito 2 é simulado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema do 2º corpo de um sistema de evaporadores quádruplos efeitos com alimentação concorrente



Fonte: Autor, 2019.

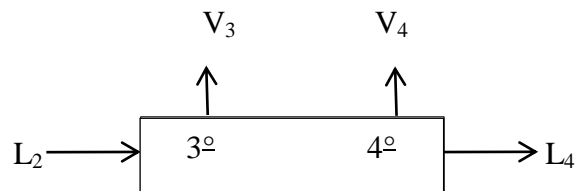
Balances de massa

$$L_1 = V_2 + L_2 \quad (24)$$

$$L_1 \cdot x_1 = L_2 \cdot x_2 \quad (25)$$

O traçado das partes subsequentes ao segundo estágio é configurado na Figura 16.

Figura 16 - Esboço das entradas e saídas imediatamente posteriores ao 2º corpo



Fonte: Autor, 2019.

Balances de massa

$$L_2 = V_3 + V_4 + L_4 \quad (26)$$

$$L_4 \cdot x_4 = L_2 \cdot x_2 \quad (27)$$

$$L_4 = L \cdot x / x_4 \quad (28)$$

$$L_2 = V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (29)$$

$$L_1 = V_2 + L_2 \quad (30)$$

$$L_1 = V_2 + V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (31)$$

Balço de energia

$$V_1.H_{1v}+L_1.h_1=V_1.H_{1L}+V_2.H_2+L_2.h_2 \quad (32)$$

$$V_1.(H_{1v}-H_{1L})=V_2.H_2+L_2.h_2-L_1.h_1 \quad (33)$$

$$H_{1v}-H_{1L}=\lambda_2 \quad (34)$$

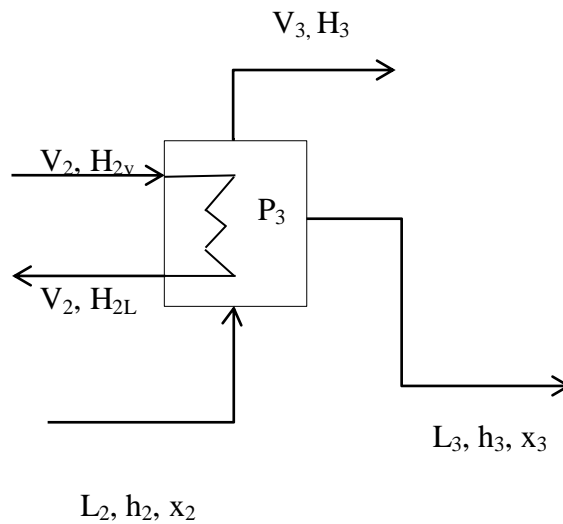
$$V_1.\lambda_2=V_2.H_2+(V_3+V_4+L.x/x_4).h_2-(V_2+V_3+V_4+L.x/x_4).h_1 \quad (35)$$

$$V_1.\lambda_2+V_2.(h_1-H_2)+V_3.(h_1-h_2)+V_4.(h_1-h_2)=(h_2-h_1).L.(x/x_4) \quad (36)$$

#### 4.3 Efeito 3

Correlatamente ao Efeito 1 são definidas as vazões e frações mássicas, entalpias, pressão e calor latente para o Efeito 3, assim como as equações redigidas abaixo. O efeito 3 é revelado na Figura 17.

**Figura 17 - Esquema do 3º corpo de um sistema de evaporadores quántuplos efeitos com alimentação concorrente**



Fonte: Autor, 2019.

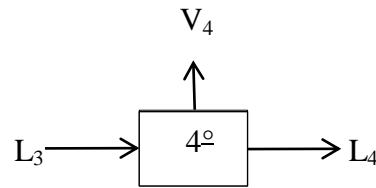
Balços de massa

$$L_3=V_4+L_4 \quad (37)$$

$$L_4.x_4=L_3.x_3 \quad (38)$$

A planta do evaporador 4 conjuntamente com as entradas de caldo e saídas de vapor e caldo são esquematizadas na Figura 18.

Figura 18 - Esboço das entradas e saídas imediatamente posteriores ao 3º corpo



Fonte: Autor, 2019.

Balanços de massa

$$L_3 = V_4 + L_4 \quad (39)$$

$$L_4 \cdot x_4 = L \cdot x \quad (40)$$

$$L_4 = L \cdot x / x_4 \quad (41)$$

$$L_3 = V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (42)$$

$$L_2 = V_3 + L_3 \quad (43)$$

$$L_2 = V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (44)$$

Balanço de energia

$$V_2 \cdot H_{2v} + L_2 \cdot h_2 = V_2 \cdot H_{2L} + V_3 \cdot H_3 + L_3 \cdot h_3 \quad (45)$$

$$V_2 \cdot (H_{2v} - H_{2L}) = V_3 \cdot H_3 + L_3 \cdot h_3 - L_2 \cdot h_2 \quad (46)$$

$$H_{2v} - H_{2L} = \lambda_3 \quad (47)$$

$$V_2 \cdot \lambda_3 = V_3 \cdot H_3 + (V_4 + L \cdot x / x_4) \cdot h_3 - (V_3 + V_4 + L \cdot x / x_4) \cdot h_2 \quad (48)$$

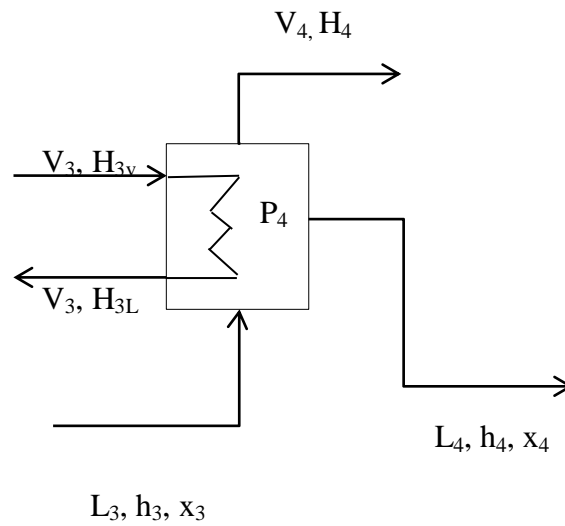
$$V_2 \cdot \lambda_3 + V_3 \cdot (h_2 - H_3) + V_4 \cdot (h_2 - h_3) = (h_3 - h_2) \cdot L \cdot (x / x_4) \quad (49)$$

#### 4.4 Efeito 4

Semelhantemente ao Efeito 1 são estabelecidas as grandezas do Efeito 4 e este é tracejado logo abaixo na Figura 19.



**Figura 19 - Esquema do 4º corpo de um sistema de evaporadores múltiplos efeitos com alimentação concorrente**



Fonte: Autor, 2019.

Balanços de massa

$$L_3 = V_4 + L_4 \quad (50)$$

$$L_4 \cdot x_4 = L \cdot x \quad (51)$$

$$L_4 = L \cdot x / x_4 \quad (52)$$

$$L_3 = V_4 + L \cdot x / x_4 \quad (53)$$

$$L_3 \cdot x_3 = L_4 \cdot x_4 \quad (54)$$

$$L_3 = L_4 \cdot x_4 / x_3 \quad (55)$$

$$L_3 = L \cdot x / x_3 \quad (56)$$

Balanco de energia

$$V_3 \cdot H_{3v} + L_3 \cdot h_3 = V_3 \cdot H_{3L} + V_4 \cdot H_4 + L_4 \cdot h_4 \quad (57)$$

$$V_3 \cdot (H_{3v} - H_{3L}) = V_4 \cdot H_4 + L_4 \cdot h_4 - L_3 \cdot h_3 \quad (58)$$

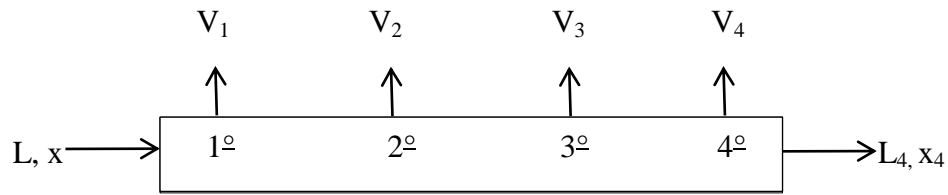
$$H_{3v} - H_{3L} = \lambda_4 \quad (59)$$

$$V_3 \cdot \lambda_4 = V_4 \cdot H_4 + (L \cdot x / x_4) \cdot h_4 - (V_4 + L \cdot x / x_4) \cdot h_3 \quad (60)$$

$$V_3 \cdot \lambda_4 + V_4 \cdot (h_3 - H_4) = (h_4 - h_3) \cdot L \cdot (x / x_4) \quad (61)$$

O balanço global para todo o conjunto também foi realizado e é ressaltado a seguir na Figura 20.

**Figura 20 - Esboço da entrada, saída e vapores gerados no sistema**



Fonte: Autor, 2019.

A partir da delineação da Figura 20 são concebidos os balanços de massa global e por componentes detalhados imediatamente abaixo nas próximas equações.

$$L = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + L_4 \quad (62)$$

$$L_4 \cdot x_4 = L \cdot x \quad (63)$$

$$L_4 = L \cdot x / x_4 \quad (64)$$

Logo

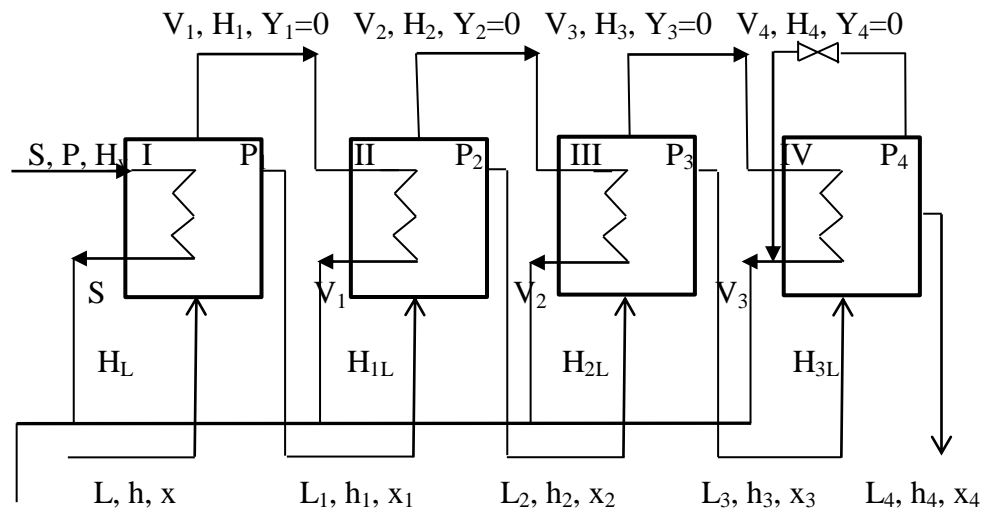
$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = L - L_4 \quad (65)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = L - L \cdot x / x_4 \quad (66)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = L \cdot (1 - x / x_4) \quad (67)$$

O sistema estudado neste trabalho é projetado na Figura 21.

**Figura 21 - Sistema de evaporadores de quadruplos efeitos para alimentação concorrente**



Fonte: Autor, 2019.

O conjunto de equações que foram obtidas em cada evaporador e no sistema é apresentado logo abaixo.

$$S \cdot \lambda_1 + V_1 \cdot (h - H_1) + V_2 \cdot (h - h_1) + V_3 \cdot (h - h_1) + V_4 \cdot (h - h_1) = (h_1 - h) \cdot L \cdot (x / x_4) \quad (23)$$

$$V_1.\lambda_2 + V_2.(h_1-H_2) + V_3.(h_1-h_2) + V_4.(h_1-h_2) = (h_2-h_1).L.(x/x_4) \quad (36)$$

$$V_2.\lambda_3 + V_3.(h_2-H_3) + V_4.(h_2-h_3) = (h_3-h_2).L.(x/x_4) \quad (49)$$

$$V_3.\lambda_4 + V_4.(h_3-H_4) = (h_4-h_3).L.(x/x_4) \quad (61)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = L.(1 - x/x_4) \quad (67)$$

O modelo matemático foi colocado na forma matricial exibida na sequência.

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & (h-H_1) & (h-h_1) & (h-h_1) & (h-h_1) \\ 0 & \lambda_2 & (h_1-H_2) & (h_1-h_2) & (h_1-h_2) \\ 0 & 0 & \lambda_3 & (h_2-H_3) & (h_2-h_3) \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & (h_3-H_4) \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} S \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h_1-h).L.(x/x_4) \\ (h_2-h_1).L.(x/x_4) \\ (h_3-h_2).L.(x/x_4) \\ (h_4-h_3).L.(x/x_4) \\ L.(1 - x/x_4) \end{bmatrix} \quad (68)$$

Após a solução do sistema linear dado pela equação (68) as demais correntes do processo são calculadas:

$$L_1=L-V_1 \quad (69)$$

$$L_2=L_1-V_2 \quad (70)$$

$$L_2= L-V_1-V_2 \quad (71)$$

$$L_3=L_2-V_3 \quad (72)$$

$$L_3= L-V_1-V_2-V_3 \quad (73)$$

$$L_4=L_3-V_4 \quad (74)$$

$$L_4= L-V_1-V_2-V_3-V_4 \quad (75)$$

Além disso, podem-se computar as concentrações na saída de cada efeito através das equações mostradas nas próximas linhas.

$$x_1=x.(L/L_1) \quad (76)$$

$$x_2=x_1.(L_1/L_2) \quad (77)$$

$$x_3=x_2.(L_2/L_3) \quad (78)$$

$$x_4=x_3.(L_3/L_4) \quad (79)$$

A forma matricial será introduzida no programa computacional conjuntamente com dados que têm a gênese no artigo do Kaya e Sarac de 2004. Alguns desses dados são apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1 - Dados oriundos do artigo do Kaya e Sarac (2004)**

ITENS	BRIX	TEMPERATURA (°C)	PRESSÃO (bar)
Vapor		111,4	1,5
Caldo clarificado	15,00	35,00	
Caixa 1		99,63	1,0
Caixa 2		89,95	0,7
Caixa 3		81,33	0,5
Caixa 4	65,00	69,10	0,3

**Fonte: Autor, 2019.**

A vazão do caldo na entrada é 100000 kg/h.

Esses valores foram inseridos no programa desenvolvido em ambiente MATLAB, versão 2015.

O programa gerou resultados da vazão mássica de vapor de aquecimento (S) e para cada efeito apresentou a vazão mássica de vapor produzido (V), a vazão mássica de solução concentrada produzida (L), o Brix (bx) e a área de troca térmica (A).

Algumas simplificações foram introduzidas no modelo matemático. Foi desconsiderada a elevação do ponto de ebulição (EPE) em cada efeito e a capacidade calorífica (C) foi considerada constante, pois estava ocorrendo um problema de convenção no algoritmo com a interação. Também foram desprezadas as perdas de calor para o ambiente. Além disso, considerou-se que não há perda de sacarose no sistema de evaporadores de múltiplos efeitos e que o vapor de cada estágio é saturado.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

O objetivo ao se realizar este trabalho era avaliar a eficiência energética de um sistema múltiplo efeitos, mais precisamente uma unidade sucroenergética, na etapa de evaporação, porém devido às dificuldades de obtenção de informações optou-se por usar valores presentes no artigo *Mathematical modeling of multiple-effect evaporators and energy economy* de autoria de Kaya e Sarac (2004). Esses pesquisadores utilizaram dados de uma fábrica de açúcar (refinaria) e desenvolveram a pesquisa para um sistema de múltiplos evaporadores com 4 efeitos e diferentes configurações.

O artigo mencionado contém informações de Brix do caldo na entrada, Brix do xarope na saída, vazão de caldo na entrada, temperatura do caldo na entrada, pressões, etc. Esses parâmetros foram introduzidos num programa e foram analisados os resultados obtidos na alimentação concorrente. Essa conformação é adotada nas unidades sucroalcooleiras, pois evita a degradação do açúcar.

No programa computacional são inseridas além dos parâmetros anteriormente relatados, fórmulas desenvolvidas na Metodologia e correlações da temperatura do caldo na saída do efeito, do coeficiente global de troca térmica e da área de troca térmica para cada efeito.

Os valores da alimentação concorrente sem pré-aquecimento presentes no artigo são apresentadas no Quadro 2.

**Quadro 2 – Dados da alimentação concorrente presentes no artigo**

S (kg/h)	V <sub>1</sub> (kg/h)	V <sub>2</sub> (kg/h)	V <sub>3</sub> (kg/h)	V <sub>4</sub> (kg/h)	COP
29917.09	18287.1	19120.3	19567.8	19947.7	2.57

Fonte: Autor, 2020.

E os resultados obtidos com o programa para a mesma conformação são visualizados no Quadro 3.

**Quadro 3 – Valores gerados pelo programa computacional para a alimentação concorrente**

S (kg/h)	V <sub>1</sub> (kg/h)	V <sub>2</sub> (kg/h)	V <sub>3</sub> (kg/h)	V <sub>4</sub> (kg/h)	COP
17171	17734	18966	19739	20484	4.48

Fonte: Autor, 2020.

A média dos vapores produzidos em cada evaporador no Quadro 1 é 19230.725 kg/h e a média dos vapores produzidos no Quadro 2 é 19230.75 kg/h, ou seja, praticamente iguais.

O vapor servido (S) obtido pelo programa foi menor que o do artigo e isso consequentemente interferiu no valor do COP, aumentando-o.

Quanto maior é o COP maior é a eficiência energética, portanto maior é a economia de energia do sistema de evaporadores de múltiplos efeitos. O valor do coeficiente de desempenho obtido no matlab deveria ter sido menor e mais próximo de 2.57.

Kaya e Sarac (2004) não mencionaram quais correlações foram usadas no artigo. Como elas são desconhecidas, utilizaram-se neste trabalho as correlações consideradas mais adequadas. E isso repercutiu nos resultados alcançados.

Brix é uma escala que representa a quantidade de sólidos solúveis presentes na solução. É a estimativa da porcentagem de açúcar de sacarose dissolvida em água.

Os valores do Brix para cada evaporador auferidos pelo programa estão no Quadro 4.

**Quadro 4 – Valores de Brix para cada evaporador gerado pelo programa computacional**

Efeito	Efeito 1	Efeito 2	Efeito 3	Efeito 4
Brix (%)	0.18	0.24	0.34	0.65

Fonte: Autor, 2020.

O soluto foi sendo concentrado ao passar de estágio em estágio e saiu no quarto efeito com um valor de 65 °Brix, dentro dos padrões esperados pela literatura.

Segundo Lopes e Parazzi (1992, apud CHAVES, 2015, p. 24), “o caldo que entra no processo de evaporação possui concentração de 14° a 17° Brix, sendo elevada até valores entre 50° e 70° Brix”

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

Os valores obtidos no Quadro 4 para o efeito 4 correspondem, aproximadamente, aos descritos pela literatura e foram bastante satisfatórios.

## 6 CONCLUSÃO

Neste TCC estudou-se a eficiência energética de um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos dando ênfase a conformação concorrente, visto que esta é a empregada na usina sucroalcooleira, e com o auxílio de um programa computacional comparou-se os resultados logrados nele com o que está descrito numa pesquisa. O ideal seria a utilização de dados reais, mas como as indústrias não costumam disponibilizá-los com receio da concorrência não foi possível empregá-los.

O programa computacional utilizado trabalha com condições ideais e parâmetros como corrosão, incrustação e espumas não foram incorporados ao mesmo. Além disso, as correlações empregadas no artigo que influenciou este trabalho não foram divulgadas. Esse conjunto de situações interferiu nos resultados alcançados acabando por revelar certas divergências quando comparados com os da pesquisa.

O programa não abarcou seu pleno desenvolvimento, porém com aperfeiçoamentos ele pode vir a gerar resultados melhores e adquirir aplicabilidade na indústria alimentícia. Não obstante, seu estudo foi importante para rememorar tópicos de introdução à computação. Outras áreas do conhecimento como termodinâmica, operações unitárias e balanço de massa e energia também tiveram enorme contribuição neste trabalho final de curso e na sedimentação de conhecimentos adquiridos ao longo da graduação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A PRODUÇÃO de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo). **Nova Cana**. Disponível em: <https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo>. Acesso em: 04 jun. 2019.

ACOMPANHAMENTO da safra brasileira de cana-de-açúcar. **CONAB**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 1-62, maio 2018. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/17727\\_4e54c5103a0ab4a15529e35307c79b2e](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/17727_4e54c5103a0ab4a15529e35307c79b2e). Acesso em: 31 jun. 2019.

ALBUQUERQUE, C.G. **Desenvolvimento de Estratégias de Controle do Processo de Evaporação de Múltiplos Efeitos na Produção de Açúcar**. Relatório Final de Projeto. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2014.

ARAÚJO, E. C. C. **Evaporadores**. São Carlos: EdUFSCar, 2011.

BARROS, W. **Desafios e Perspectivas dos Estados: Alagoas destaca-se como maior produtor de cana-de-açúcar**. 2018. Disponível em: <http://radioagencianacional.etc.com.br/geral/audio/2018-09/>. Acesso em: 03 jun. 2019.

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: 05 jun. 2019.

BRASIL, N. I. **Introdução à Engenharia Química**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.

CHAVES, T. C. **Avaliação de Desempenho de um Conjunto Evaporador Quíntuplo Efeito Empregado na Produção de Açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2015.

COADJUVANTE Enérgico. **Revista Alcoolbrás**, São Paulo, ed. 103. 2006. [http://revistaalcoolbras.com.br/edicoes/ed\\_103/ed\\_103.htm](http://revistaalcoolbras.com.br/edicoes/ed_103/ed_103.htm). Acesso em: 04 jun. 2019.

CRIVELLARO, F. P. P; PEREIRA, A. A.; FREITAS, I. R.; **Dimensionamento de um Pré-Evaporador Modelo Robert's Para Concentrar Caldo-de-Cana**. Centro Universitário do Norte Paulista. Curso de Engenharia Química. 2016.

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

GEANKOPLIS, C.J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. 3ª ed. México: Cecsa, 1998.

GUIMARÃES, B.A. **Aumento de Eficiência Energética com Evaporador de Múltiplo Efeito em Comparação ao Evaporador de Simples Efeito**. Disponível em: <http://www.etcanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-v/>. Acesso em: 22 mar. 2018.



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.

KAYA, D.; SARAC, H. I.; **Mathematical Modeling of Multiple-Effect Evaporators and Energy Economy**. *Energy* 32: 1536–1542. 2004.

SANTOS, L. J. C. **Avaliação do Ciclo de Vida e Custeio do Ciclo de Vida de Evaporadores Para Usina de Açúcar**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2007.

SILVA, A. M. **Relatório de Estágio Supervisionado**. Universidade Federal da Paraíba. Departamento de Engenharia Química. Campina Grande, 1987.

SILVA, J.P.N.; SILVA, M. R. N. **Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Campus Inhumas. Inhumas, 2012. Disponível em: [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico\\_acucar\\_alcool/nocoos\\_cultura\\_cana\\_acucar.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico_acucar_alcool/nocoos_cultura_cana_acucar.pdf). Acesso em: 08 jun. 2020.

SILVA, P.R.S. **Simulação Dinâmica e Otimização de Evaporadores de Múltiplos Efeitos em Biorrefinarias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Rio de Janeiro, 2013.

WESTPHALEN, D.N. **Modelagem, Simulação e Otimização de Sistemas de evaporação**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Departamento de Processos Químicos. Campinas, 1999.