

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS – MG**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MÁRIO CÉSAR DA SILVA**

N. CLASS.	U62118
CUTTER	5586e
ANO/EDIÇÃO	2012.

**EVAPORADORES: Economia energética em sistemas de evaporação.**

**Varginha**

**2012**

**FEPESMIG**

**MÁRIO CÉSAR DA SILVA**

**EVAPORADORES: Economia energética em sistemas de evaporação.**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica  
do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS MG  
para obtenção de grau de bacharel, sob a orientação do  
Prof. Luiz Carlos Vieira Guedes

**Varginha**  
**2012**

**FEPESMIG**

**MÁRIO CÉSAR DA SILVA**

**EVAPORADORES: Economia energética em sistemas de evaporação.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel composta pelo membro:

Aprovado em    /    /

---

Prof. Alexandre Lopes (Coordenador)

---

Prof. João Mario Mendes de Freitas

---

Prof. Nilson Antônio de Carvalho

Obs.:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, a minha noiva Márcia, aos meus pais, aos meus amigos e a todos meus colegas e professores e a todos aqueles que contribuíram para sua realização.

**Grupo Educacional UNIS**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus o “Criador”, por ter me dado força e coragem para superar todos os obstáculos e dificuldades deste percurso. De modo especial a minha noiva Márcia que nos momentos mais difíceis soube compreender minha ausência, apoiando e contribuindo para a realização deste sonho. Aos meus pais, pelo incentivo nesta caminhada. Aos meus colegas de sala pela amizade e compreensão. A todos, a minha sincera gratidão.

**“Máquinas não têm idéias, não resolvem problemas, não agarram oportunidades. Somente pessoas que estejam envolvidas e pensando fazem a diferença”.**

**Gary Dessle**

**Grupo Educacional UNIS**

## RESUMO

A evaporação é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria alimentícia. A concentração de muitos produtos é feita desta forma através do uso de evaporadores como, por exemplo, nas indústrias de alimentos, bebidas, tintas e farmacêuticos. Conhecidos como grandes consumidores de energia térmica, os evaporadores têm sido estudados nos últimos anos com o objetivo de redução no consumo de energia. Algumas técnicas, como a evaporação em múltiplos efeitos e o aproveitamento de condensado podem trazer bons resultados, quando se analisa apenas esta operação unitária, isolada do processo. No entanto, melhores resultados podem ser obtidos quando evaporadores não são estudados isoladamente, e sim como parte de um processo. Normalmente são utilizadas baterias de evaporadores em múltiplos efeitos, organizados conforme diferentes configurações de escoamento das soluções processadas. Na análise desses sistemas, a literatura de Operações Unitárias traz propostas de metodologias simplificadas, normalmente desprezando os efeitos do aumento da elevação da temperatura de ebulição da solução, com bons resultados para sistemas nos quais estes são pequenos. Assim, este trabalho procura mostrar sistemas economizadores de vapor mais utilizados em evaporadores, com a utilização desses economizadores teremos uma diminuição no consumo de vapor de caldeira no processo de evaporação.

**Palavras-chave:** Economizadores. Evaporador de um efeito. Evaporador múltiplo efeito.

## **ABSTRACT**

*Evaporation is one of the most used unit operations at chemical industries. The concentration of many products is easily carried out through the use of evaporators. Some examples can be found in food, drink, paint and pharmaceutical industries. As a great heat consumer, evaporators have been studied with the objective of reducing their energy consumption. Some techniques, like multiple-effect evaporation and utilization of condensates can bring good results, when this unit operation is analyzed isolated from the process. On the other hand, better results can be obtained when evaporators are analyzed as a part of the whole process. Normally batteries are used in multiple effect evaporators, organized as different configurations of flow solutions processed. When analyzing these systems, the literature provides Unit Operations proposed simplified methodologies generally neglecting the effects of increased elevation of the boiling point of the solution, with satisfactory results for systems in which these are small. This study sought to use a more general methodology for the calculation of multiple effect evaporators analysis, considering the product evaporated.*

**Keywords:** *Economizers. Evaporator of effect. Multiple effect evaporator.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Esquema típico de um evaporador.....	14
Figura 02 – Evaporadores Solares.....	16
Figura 03 – Tacho a vácuo.....	17
Figura 04 – Evaporador com circulação natura com (a) calandra (b) tubos verticais.....	18
Figura 05 – Evaporador com circulação forçada .....	19
Figura 06 – Evaporador com filme descendente .....	20
Figura 07 – Evaporador com filme agitado .....	21
Figura 08 – Evaporador de placas.....	22
Figura 09 – Compromisso econômico na otimização do numero de efeitos.....	24
Figura 10 – Evaporador com três efeitos.....	25
Figura 11 – Sistema de evaporação nas configurações de alimentação (a) frontal (b) reversa e (c) mista.....	26
Figura 12 – Evaporador com recompressão mecânica .....	28
Figura 13 – Termocompressão.....	29
Figura 14 – Injetor de vapor.....	30
Figura 15 – Evaporador com tambor.....	30
Figura 16 – Evaporador com aproveitamento do Segundo efeito .....	31
Figura 17 – Evaporador de um efeito .....	32
Figura 18 – Evaporador com três efeitos .....	34

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO</b> .....	<b>13</b>
2.1 Princípios e aplicações .....	13
<b>3 EQUIPAMENTOS DE EVAPORAÇÃO</b> .....	<b>16</b>
3.1 Evaporadores solares.....	16
3.2 Tacho a vácuo .....	17
3.3 Evaporadores com circulação natural .....	17
3.4 Evaporadores com circulação forçada .....	19
3.5 Evaporadores de filme descendentes .....	19
3.6 Evaporadores de filme agitado .....	20
3.7 Evaporadores de placas .....	22
<b>4 ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA</b> .....	<b>23</b>
4.1 Evaporador em múltiplos efeitos.....	23
4.2 Recompressão mecânica .....	27
4.3 Termocompressão .....	28
4.4 Tambor de expansão .....	30
4.5 Aproveitamento de condensado .....	31
<b>5 SISTEMAS DE ECONOMIA NA EVAPORAÇÃO</b> .....	<b>32</b>
5.1 Sistema de um efeito .....	32
5.2 Sistema de múltiplos efeitos .....	34
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A evaporação é uma das operações unitárias mais empregadas nos mais diversos campos das indústrias químicas e de processamento químicos, com a finalidade de concentração de muitos produtos. Alguns exemplos da aplicação de sistemas de evaporação podem ser encontrados em fabricas de produtos alimentícios, compostos orgânicos e inorgânicos, papel e celulose, polímeros e fertilizantes.

A partir da década de 70, como consequência da grande crise de petróleo, a economia de energia passou a ser um item de grande importância para a sociedade em geral, em particular para o meio industrial. Neste cenário, uma nova ferramenta, denominada "Tecnologia Pinch" surgiu com o objetivo de se projetar redes de trocadores de calor mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia (LINNOFF, 1982). Desde então, seus princípios de integração energética no estabelecimento de metas de consumo mínimo de energia. Além de redes de trocadores, hoje em dia esta metodologia é utilizada também na análise de sistemas de destilação, bomba de calor, turbinas de co-geração, caldeiras, etc.

Nos últimos anos, a preocupação com a economia de energia tem crescido mundialmente, principalmente devido aos problemas ambientais, decorrente da queima de combustíveis fósseis. Na Conferencia de Kyoto, foram impostas taxas máximas de emissão de gases, nas formas de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio. Para que sejam respeitadas estas taxas, estratégias de redução no consumo de energia devem ser analisadas. Uma das estratégias estudadas é a substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis, como a energia eólica, solar e principalmente a proveniente de biomassa, sua queima não afeta o balanço de dióxido de enxofre na atmosfera, não contribuindo para o efeito estufa (MAX FRANCO, 2001).

Os evaporadores têm sido estudados com o objetivo de redução no consumo de energia. Algumas técnicas, como a evaporação em múltiplos efeitos e o aproveitamento de condensado podem trazer bons resultados, quando se analisa apenas essa operação unitária, isolando o processo. No entanto, melhores resultados podem ser obtidos na redução do consumo de energia quando evaporadores não são estudados isoladamente, e sim como parte de um processo (MAX FRANCO, 2001).

No processo de produção de celulose e papel, a área de recuperação química é de fundamental importância econômica. Haja vista que ela é responsável pela recuperação e regeneração dos produtos químicos inorgânicos presente no licor negro, como também para a

geração de vapor a alta pressão para a produção de energia em turbo geradores e para a secagem da folha de papel através do vapor de média pressão.

Em uma operação de evaporação, deseja-se concentrar uma determinada solução pela vaporização do solvente na ebulição. Usualmente o produto desejado é a solução concentrada, mas ocasionalmente o solvente evaporado é o produto primário, como por exemplo, no processo de evaporação da água salgada do mar para se obter água potável, livre de sais de sódio (MAX FRANCO, 2001).

Neste contexto se insere este trabalho de conclusão de curso, que consiste na proposta de uma nova metodologia para a redução no consumo de energia em sistemas de evaporação, através da utilização de evaporadores múltiplos efeitos e sistemas economizadores de energia.

Devido ao alto valor do calor latente de vaporização da água, os evaporadores são equipamentos de utilização interna de energia térmica. O contínuo desafio de ser reduzir custos em qualquer indústria faz com que sistemas de evaporação tenham uma atenção especial em estudos de economia de energia. Este trabalho pretende trazer contribuições significativas sobre este tema.

## 2 SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO

### 2.1 Princípios e aplicações

A evaporação é uma operação unitária que tem como objetivo o aumento da concentração de um soluto não volátil em um soluto volátil, normalmente água (McCABE, 1985). O princípio deste aumento de concentração é a ebulição seguida de evaporação do solvente através do emprego de calor. A fonte de calor é sempre indireta, ou seja, não há contato direto entre o fluido de aquecimento e a solução sendo concentrada. O meio de aquecimento mais encontrado nas indústrias de processo químico é o vapor saturado, provenientes de caldeiras.

A operação unitária evaporada se difere da cristalização no seu objetivo, que é de evaporar um solvente de uma solução, de preferência para formação de um produto cristalino, ou para promover o crescimento do cristal. A diferença entre os dois processos praticamente desaparece quando o produto da evaporação é uma suspensão de cristais em um líquido saturado, como na evaporação de salmoura para produzir sal comum. Por outro lado, na maioria dos processos de evaporação, o produto é um líquido denso, que pode ou não estar saturado sob as condições de operação do equipamento (MAX FRANCO, 2001).

Os sistemas de evaporação são encontrados nos mais diversos tipos de indústrias químicas, como na fabricação de hidróxido de sódio, solventes orgânicos e fertilizantes. Podem também ser utilizados nas chamadas indústrias de processos químicos, ou seja, as indústrias que utilizam os mesmos processos das indústrias químicas, mas não tem como produtos finais um produto químico. Dentro desta categoria, pode-se encontrar evaporadores na fabricação de papel e celulose, produtos farmacêuticos, alimentos e bebidas, etc.

Dentro das aplicações acima, destaca-se a indústria de alimentos, onde a operação de evaporação é encontrada em uma grande diversidade de aplicação, tais como: laticínios (leite condensado e leite evaporado), sucos de frutas concentrados, gelatina, xarope de glicose, amidos comuns, modificados ou parcialmente hidrolisados (provenientes de milho, mandioca, batata, arroz, etc.), extratos de carne, concentrados de tomate, geleias, café solúvel, açúcar, etc.

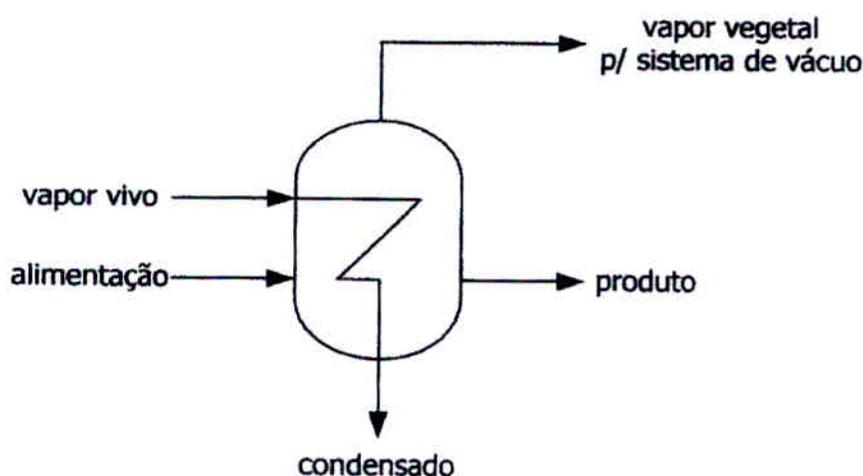
A necessidade de se concentrar uma solução muitas vezes está associada à necessidade de se reduzir custos de transporte e armazenamento de um determinado produto. Hidróxido de sódio, por exemplo, é transportado em sua forma anidra até o seu destino, onde é diluído para sua utilização. Entretanto, na indústria de alimento, a concentração de um produto também é

justificada pelo aumento de sua conservação. A remoção parcial de água de um produto alimentício acarreta a redução de sua atividade de água, o que representa um meio inóspito para o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela deterioração do alimento. Normalmente, também, a operação de evaporação é associada à pasteurização do alimento, isto é, na redução da carga microbiana pelo uso do calor (MAX FRANCO, 2001).

A evaporação, dentro da indústria de alimentos, também está fortemente relacionada com a qualidade do alimento (FELLIWS, 1988). Desta forma, os sistemas de evaporação devem ser cuidadosamente projetados para evitar a ocorrência de efeitos indesejáveis, que possam comprometer a qualidade desejada. As estratégias normalmente empregadas são a utilização de vácuo (para que a ebulição da água se dê em temperaturas menos prejudiciais ao alimento) e uso de equipamentos que permitam um pequeno tempo de resistência (para minimizar o tempo no qual o alimento se encontra em temperaturas danosas). A degradação de alimento devido ao tempo ao emprego de altas temperaturas também pode causar a formação de depósito no interior dos equipamentos de evaporação, que acabam dificultando a transferência de calor e favorecem a contaminação do produto devido ao acúmulo de microrganismos.

Com grande frequência são encontrados os termos vapor vivo e vapor vegetal para designar, respectivamente, o vapor de aquecimento e o vapor d'água resultante da evaporação.

Figura 01: Esquema típico de um evaporador.



Fonte: (BRANDÃO, 1985, p.3).

Devido ao alto valor do calor latente de vaporização da água, os evaporadores são equipamentos de utilização interna de energia térmica. O contínuo desafio de ser reduzir

custos em qualquer indústria faz com que sistemas de evaporação tenham uma atenção especial em estudos de economia de energia. Este trabalho pretende trazer contribuições significativas sobre este tema.

### 3 EQUIPAMENTOS DE EVAPORAÇÃO

Todo equipamento de evaporação consiste em uma superfície de aquecimento para a transferência de calor de um meio de aquecimento para o fluxo de processo, e um meio que afetivamente separe o vapor vegetal do líquido concentrado. O que distingue um tipo de evaporador de outro é como a separação entre o líquido e o vapor é feita. Diversas bibliografias (McCABE, 1985; MEHRA, 1986) apresentam os principais tipos de equipamentos de evaporação, os quais são resumidamente descritos nesta seção.

#### 3.1 Evaporadores solares

Certamente é uma das formas mais antigas de evaporação conhecidas e utilizadas até hoje para a produção de sal. Esta operação consiste em uma série de lagoas nas quais a água do mar é concentrada utilizando energia solar como forma de aquecimento. Depende de condições meteorológicas e raramente são utilizados em processos industriais.

Figura 02- Evaporadores solares.

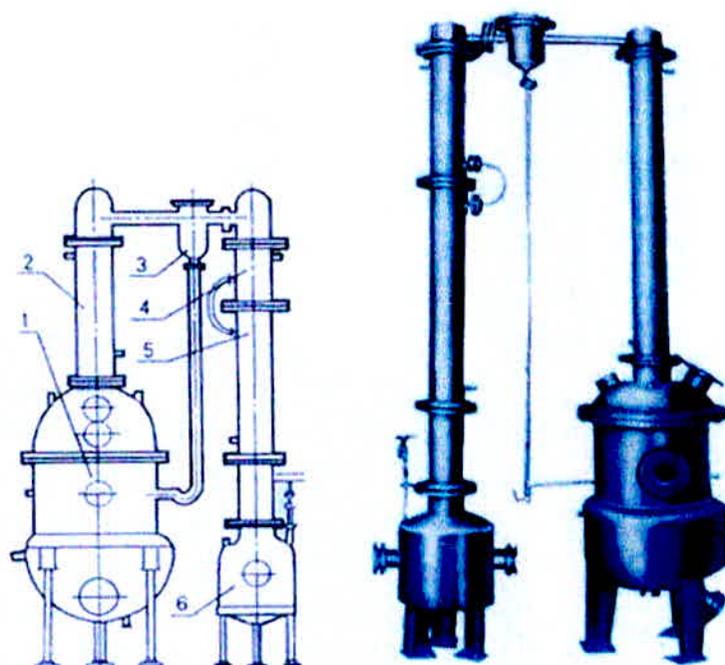


Fonte: (SABER DO SAL, 2012)

### 3.2 Tachos a vácuo

Neste evaporador, o vapor condensado está dentro de uma camisa, usa-se, geralmente um agitador central ou tipo raspador para promover convecção forçada e evitar superaquecimento localizado que pode causar sabores indesejáveis ou incrustação. Este evaporador caracteriza-se especialmente por ser de fácil construção e de fácil limpeza. São muito utilizados na fabricação de geléias e doce.

Figura 03- Tacho a vácuo.



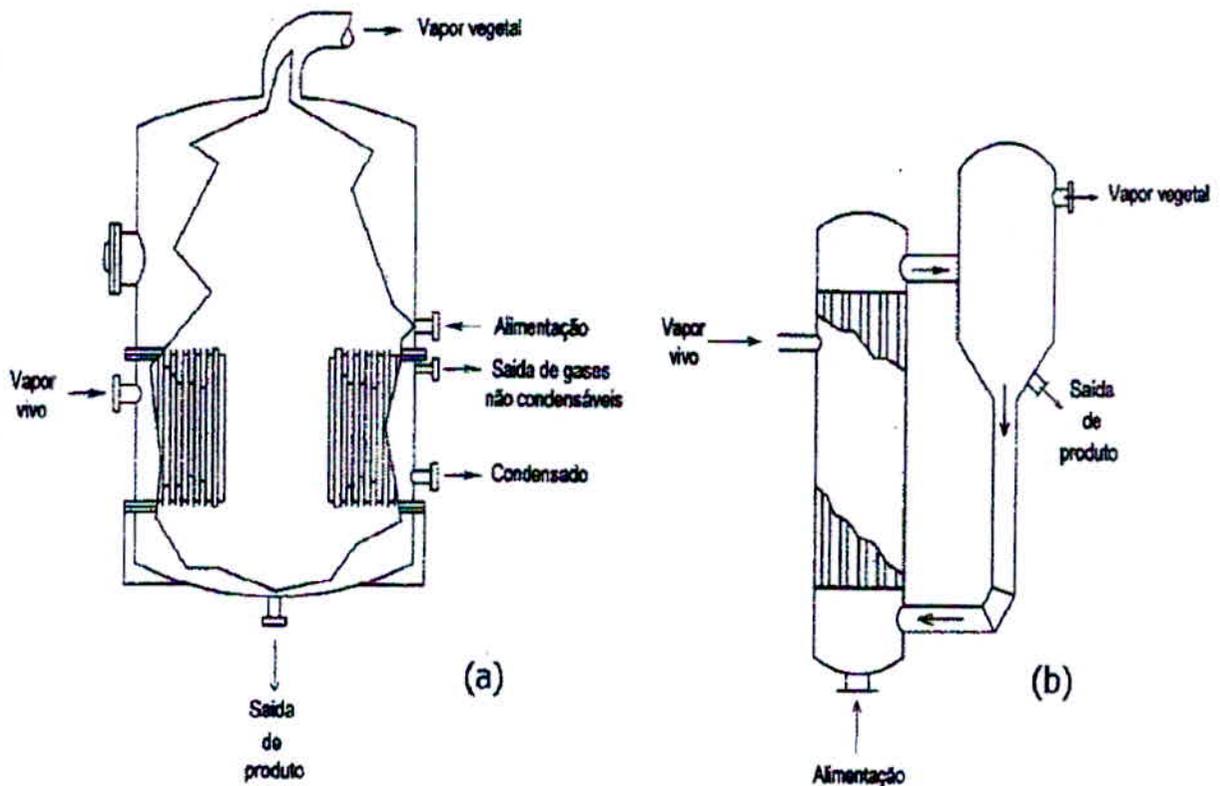
Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.8).

### 3.3 Evaporadores com circulação natural

Diversas geometrias podem ser construídas no princípio de circulação natural. Os evaporadores do tipo calandria são largamente utilizados em usinas de açúcar. A força motriz que provoca o escoamento do líquido é a diferença de densidades entre o líquido que circula pela abertura central da calandria e a mistura bifásica que escoo dentro dos tubos. A separação do vapor vegetal e do líquido é efetuado no mesmo vaso onde há o contato com o meio de aquecimento. Estes equipamentos são relativamente baratos, de simples limpeza, porém devem ser utilizados para fluidos termosensíveis, devido ao alto inerente de tempo de resistência.

Deferentemente dos aparos com calandria, nos evaporadores com recirculação em tubos verticais (figura4) essa separação é feita em um vaso de separação. Também são encontrados com grande frequência em diversos tipos de indústrias. Pelo fato destes equipamentos dependem das diferenças de densidades para ocorrer o escoamento, estes não podem ser submetidos a grandes variações de capacidade.

Figura 04- Evaporador com circulação natural com (a) calandria e (b) tubos verticais.

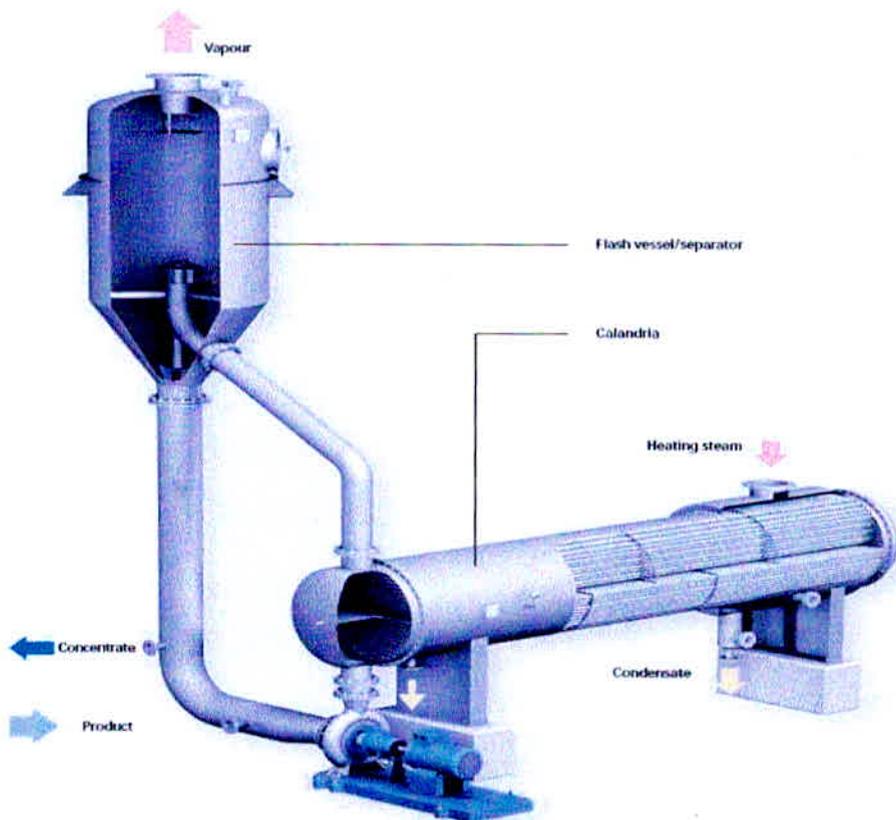


Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.10).

### 3.4 Evaporadores com circulação forçada

A circulação do líquido pelos tubos de aquecimento é obtida através do uso de bombas. Desta forma, são indicados para aplicação onde a alta viscosidade da solução não permite a operação com circulação natural. Altas velocidades de escoamento podem ser obtidas resultando em altos coeficientes de transferências de calor e pequenas áreas de troca térmicas. Diversas geometrias podem ser concebidas, e a figura 05 apresenta um evaporador de circulação forçada com tubos horizontais.

Figura 05- Evaporadores com circulação forçada



Fonte: (EVAPORADORES, 2003, p.10).

### 3.5 Evaporadores de filme descendente

São largamente utilizados na indústria de alimentos, onde se procura baixos tempos de resistências com o objetivo de minimizar danos ao produto. Nesta configuração (figura 06), o vapor condensa na superfície externa de tubos verticais e o líquido no interior do tubo. À

medida que o líquido escoamais vapor de água e formado resultando numa região central de vapor em alta velocidade que comprime o líquido contra a parede interna do tubo. Este efeito acarreta em um filme cada vez mais fino, escoando a velocidades cada vez mais altas. Altos coeficientes de transferências de calor são obtidos e também baixos valores de perda de carga. Este é o tipo de equipamento mais usado nas indústrias brasileiras de suco de laranja.

Figura 06- Evaporadores de filme descendente

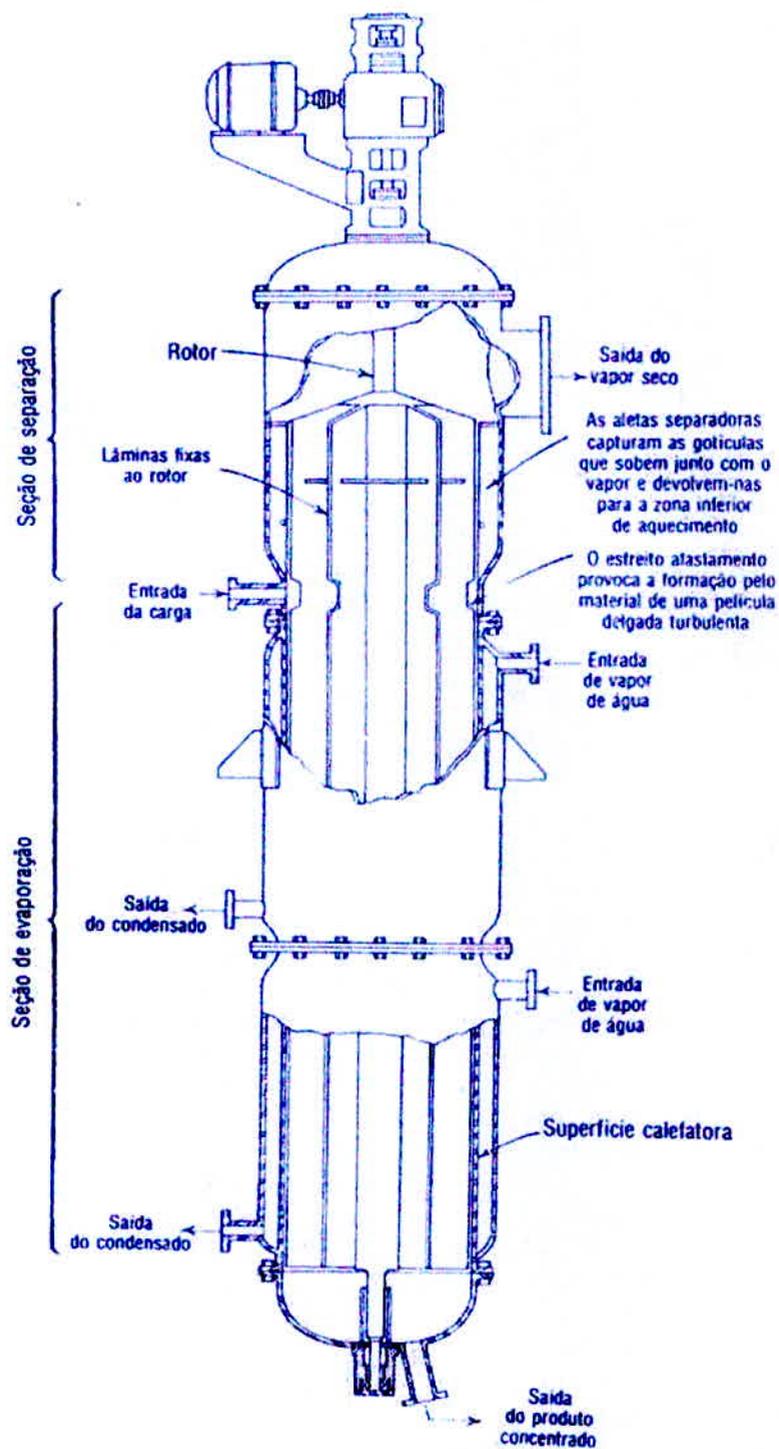


Fonte: (EVAPORADOR, 2012)

### 3.6 Evaporadores de filme agitado

São indicados para a evaporação de soluções altamente viscosas ou que apresentam partículas sólidas em suspensão. A formação de um filme descendente como descrito anteriormente não é possível. No entanto, com o objetivo de se explorar os mesmos princípios dos evaporadores de filme descendente, o filme pode ser formado com o auxílio de pás rotativas que continuamente espalham o líquido nas paredes dos tubos.

Figura 07- Evaporador de filme agitado

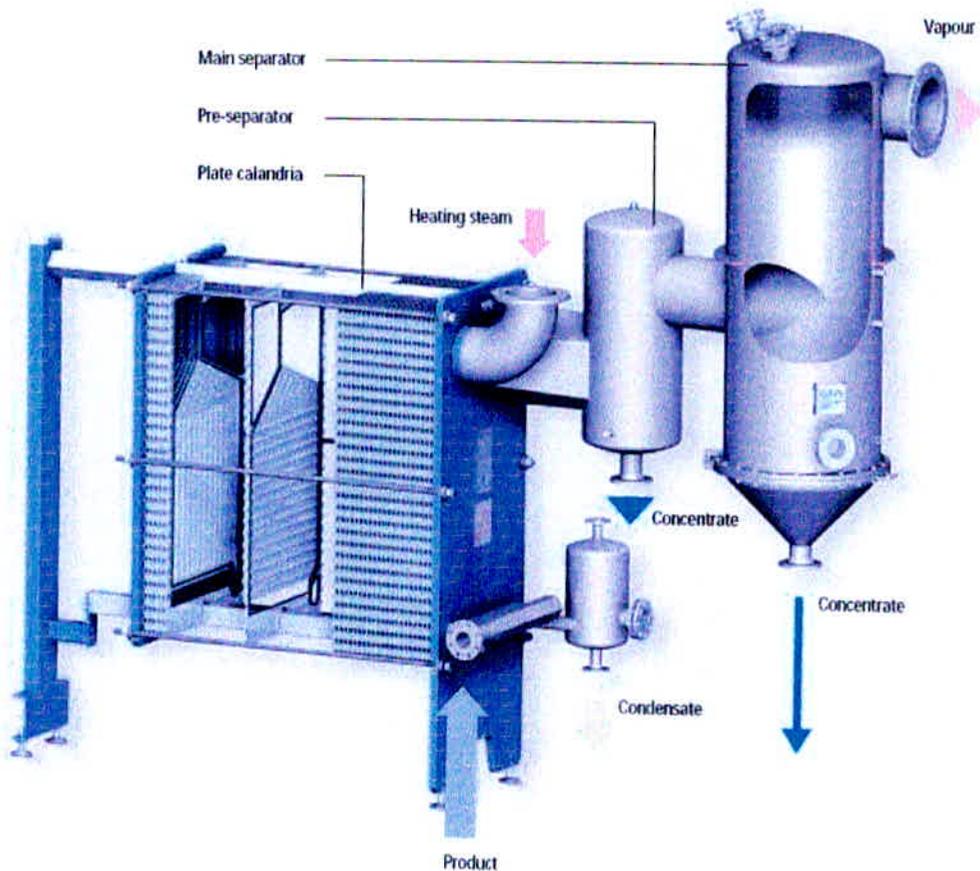


Fonte: (BRANDÃO, 1985, p.16)

### 3.7 Evaporadores de placas

Trocadores de calor de placas, quando comparados com trocadores convencionais tipo casco-tubo, apresentam uma série de vantagens como, por exemplo, altas velocidades de escoamento que geram altos coeficientes de troca térmica, pequenas áreas de instalação, facilidade de limpeza, ausência de pontos mortos onde pode ocorrer acúmulo de material, etc. na mesma linha, foram propostos evaporadores de placas que apresentam vantagens semelhantes aos trocadores de placas, quando comparados com outros tipos de equipamentos de evaporação.

Figura 08- Evaporador de placa



Fonte: (EVAPORADOR FATEB, 2003, p.26)

## 4 ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA

Como já comentado anteriormente, os sistemas de evaporação são grandes consumidores de energia térmica. Em virtude disto, diversas estratégias são empregadas com o objetivo de se reduzir o consumo de energia nestes equipamentos.

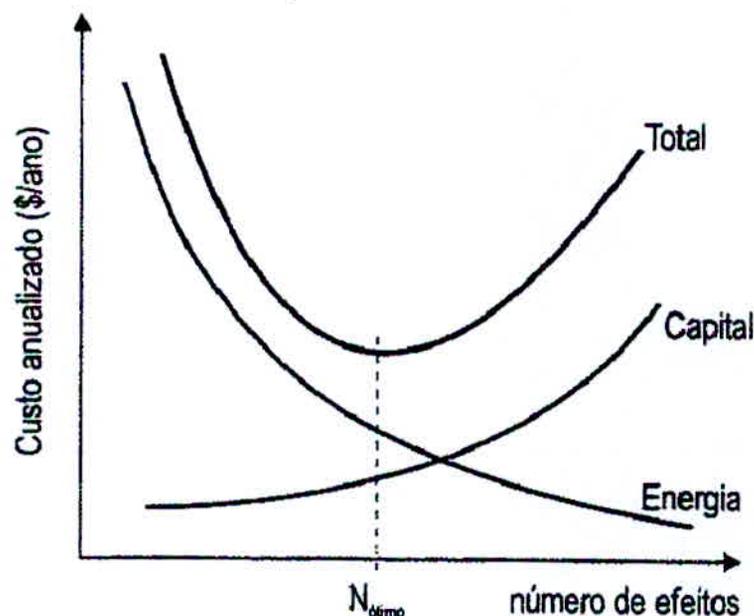
### 4.1 Evaporação em múltiplos efeitos

A evaporação em múltiplos efeitos é comumente utilizada em indústrias de processos químicos com o objetivo de se reduzir os consumos de energia e água de resfriamento. Neste sistema, vários corpos de evaporação são ligados por tubulações de modo que o vapor gerado em um efeito passe para o seguinte, em série. Desta forma, o calor fornecido ao primeiro corpo de evaporação é utilizado para evaporar água em um primeiro efeito. Este vapor gerado passa para o efeito seguinte, até que finalmente, o calor fornecido pelo último efeito passa ao condensador.

A vantagem deste arranjo é a reutilização de calor fornecido ao primeiro efeito de evaporação, resultante em economia de energia no sistema de evaporação como um todo. A economia em um sistema de evaporação é definida como a razão entre a quantidade total de água evaporada e a quantidade de vapor fornecido ao primeiro efeito. Um aumento no número de efeitos representa um aumento na economia em um sistema de evaporação. Uma aproximação grosseira sobre a economia de energia em sistemas de evaporação pode ser obtida multiplicando-se o número de efeitos por 0,8 (DURAND, 1996). Além da economia de vapor, como o aumento do número de efeitos há também economia de água de resfriamento no condensador. Isto porque o equipamento opera somente com o vapor gerado no último efeito.

Por outro lado, o aumento no número de efeitos acarreta menores diferenças de temperatura empregadas como força motriz em cada efeito, causando um aumento na área de troca térmica necessária, também aumentando, portanto, os custos fixos. Por isto, a escolha do número de efeitos apropriado ou seja, ótimo, é função de um balanço econômico entre a economia de vapor e água de resfriamento e o custo de investimento (KING, 1980).

Figura 09- Compromisso econômico na otimização do número de efeitos

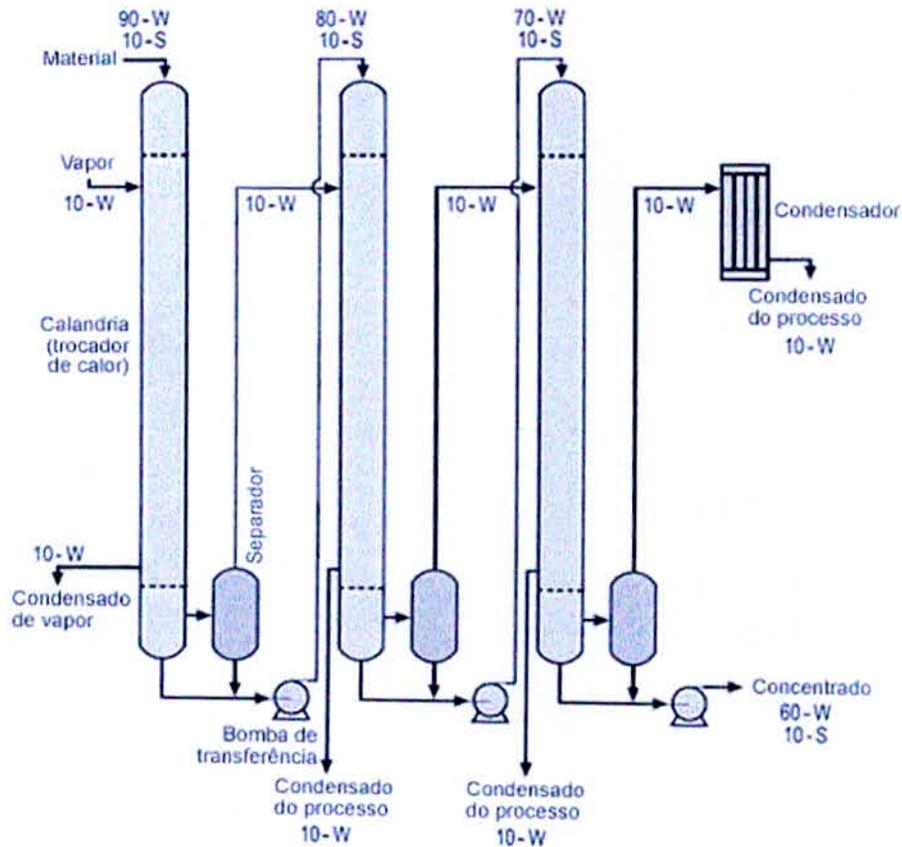


Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.18)

A figura 09 apresenta um evaporador com três efeitos. Neste exemplo, observa-se que a alimentação da solução diluída se dá no mesmo efeito que alimentação de vapor vivo. O vapor vegetal e a solução concentrada resultantes deste primeiro efeitos seguem para o segundo efeitos. Entretanto, estas duas corrente são resultantes da ebulição de um dado líquido e se encontram na mesmo temperatura.

Como consequências, este vapor vegetal não pode ser utilizado como meio de aquecimento de um líquido que se encontra na mesma temperatura. Para que ocorra transferência de calor entre fluidos é necessário que exista diferença de temperatura entre estes fluidos. Assim, a decisão tomada para estes casos é a ebulição da solução no segundo efeito em uma pressão menor que a pressão de operação do primeiro efeito. Por esta razão, qualquer sistema de evaporação em múltiplos efeitos opera em nível decrescente de pressão, ao longo da direção dos fluxos de vapor.

Figura 10- Evaporador com três efeitos

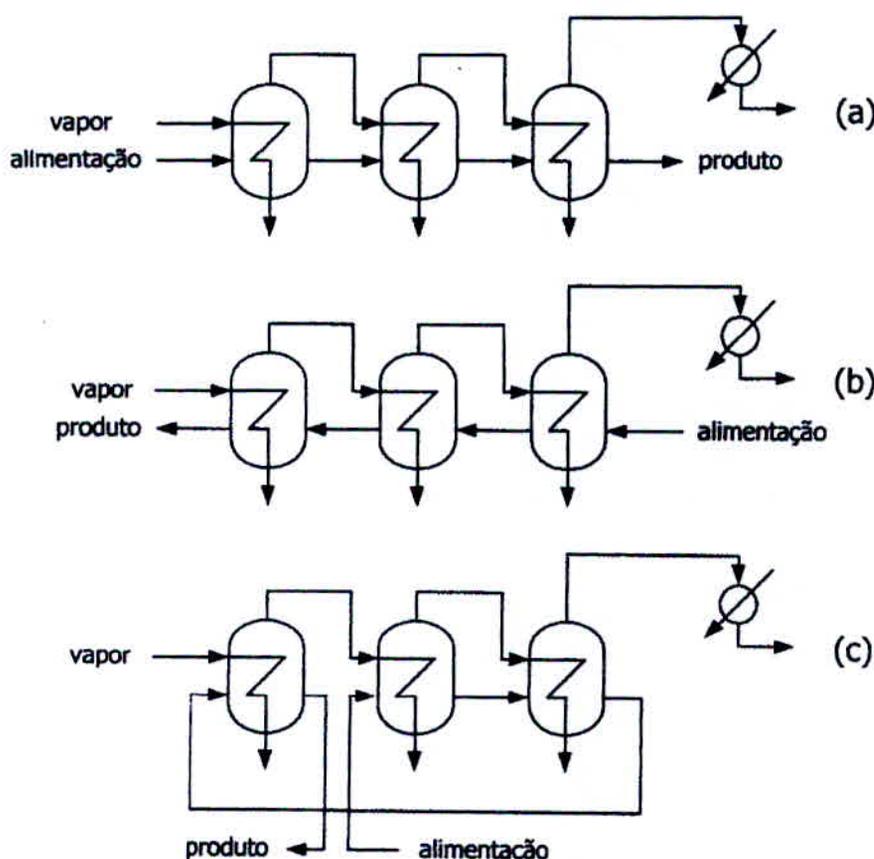


Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.22)

A utilização de múltiplos efeitos em sistemas de evaporação proporciona um grande número de possíveis arranjos em função dos fluxos de vapor e líquido. Estes possíveis arranjos podem ser classificados em: alimentação frontal, alimentação reserva, alimentação mista. A figura 11 apresenta estes três tipos básicos de arranjos em evaporadores múltiplos efeitos.

Como pode ser observado, no arranjo com alimentação frontal, a solução diluída é alimentada no mesmo efeito que o vapor vivo. Como vantagens deste arranjo, pode-se citar que o fluxo de líquido sempre acontece no sentido decrescente de pressões, que no caso de fluidos pouco viscosos, dispensa o uso de bombas para o escoamento entre os efeitos. Além disto, normalmente a degradação de produtos decorrentes de temperaturas altas é mais acentuada em grandes concentrações de sólidos. Como neste arranjo, a solução concentrada se encontra nos efeitos de menor pressão, são minimizados os efeitos indesejáveis para a qualidade do produto final.

Figura 11- Sistema de evaporação nas configurações de alimentação: (a) frontal, (b) reversa e (c) mista



Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.13)

Nos sistemas com alimentação reversa, a solução diluída é alimentada no último efeito com relação ao fluxo de vapor. O fluxo de líquido, assim, sempre se dá no sentido crescente de pressão, exigindo o uso de bombas para permitir seu escoamento. O produto concentrado deixa o evaporador no efeito de maior temperatura, e por esta razão, esta configuração não é recomendada para produtos alimentícios que podem sofrer danos por calor. A utilização deste arranjo é recomendada para produtos altamente viscosos, pois o aumento da viscosidade do líquido resultante do aumento de concentração de sólido é atenuado pelo uso de maiores temperaturas. Deve-se lembrar de que altas viscosidades resultam em baixos coeficientes de transferências de calor e equipamentos de baixa eficiência térmica.

Os sistemas com alimentação mista não possuem arranjo típico. Pode-se dizer que um evaporador com alimentação mista é aquele no qual não há divisões do fluxo de líquido, e em parte do equipamento o fluxo se dá em contracorrente com o fluxo de vapor e parte e co-corrente. Neste tipo de arranjo, busca-se explorar as vantagens dos arranjos com alimentação

frontal e reversa. Por motivos óbvios, arranjos com alimentação mista somente são encontrados em evaporação com três ou mais efeitos.

#### **4.2 Recompressão mecânica**

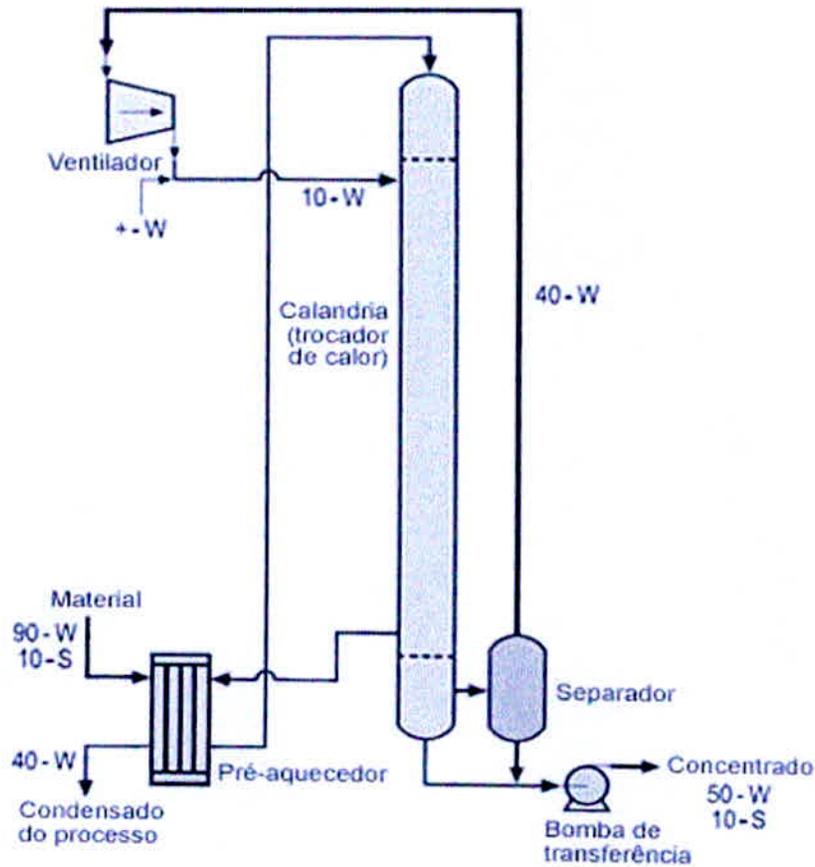
Os efeitos de um sistema de evaporação múltiplo efeito devem ser operados com pressões decrescentes para que haja diferenças de temperaturas necessárias para a transferência de calor. Seguindo este princípio, a água evaporada num efeito não pode ser utilizada diretamente como meio de aquecimento do próprio efeito.

Porém, caso se deseje utilizar o vapor vegetal de um efeito pra aquecer o próprio efeito é necessário que este vapor vegetal seja comprimido e assim forneça calor condensando numa temperatura superior a que ele foi evaporado. A recompressão mecânica que tem como função comprimir o vapor vegetal gerado num efeito e enviá-lo como meio de aquecimento para o próprio efeito ou para algum efeito anterior de um sistema múltiplo efeito.

O que se busca neste tipo de sistema é a redução no consumo de vapor vivo, entretanto, o seu uso só é justificado em locais onde o custo da energia elétrica é baixo quando comparado com o custo da energia térmica (WORRALL, 1982). O alto custo dos compressores mecânicos também dificulta a justificativa econômica para sua implantação (DINNAGE, 1975).

Também se deve notar que a recompressão mecânica nunca elimina completamente o consumo de vapor de aquecimento. Primeiramente, vapor vivo proveniente de caldeiras sempre será necessário para a partida do equipamento. Além disto, como o calor latente de vaporização da água diminui com o aumento da pressão, a quantidade de vapor recomprimido não é suficiente para a mesma quantidade de vapor em baixa pressão.

Figura 12- Evaporador com recompressão mecânica

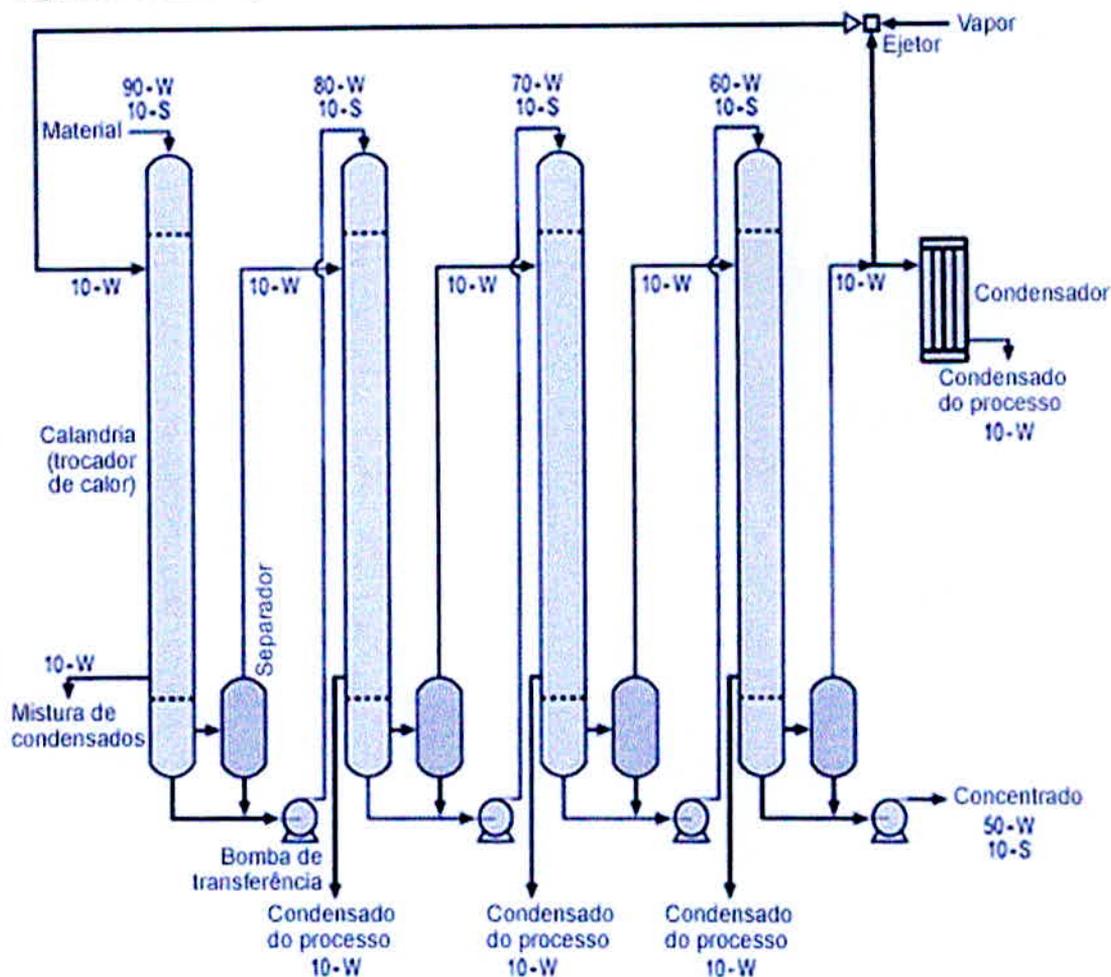


Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.21)

### 4.3 Termocompressão

Os princípios de uso da termocompressão são os mesmos da recompressão mecânica, porém nesta situação são utilizados termocompressores ao invés de compressores mecânicos. Como vantagens de um termocompressor, quando comparado a um compressor mecânico, pode-se citar: baixo custo e inexistência de partes móveis. Conseqüentemente, praticamente não existem problemas de manutenção neste tipo de equipamento (MACEK, 1992). Todavia, o seu uso só é possível quando existe disponibilidade de vapor de alta pressão na indústria. Devido à baixa eficiência dos termocompressor, o seu uso só é economicamente justificado se a diferença entre o custo do vapor de baixa e alta pressão gerado no sistema de utilização não for alto.

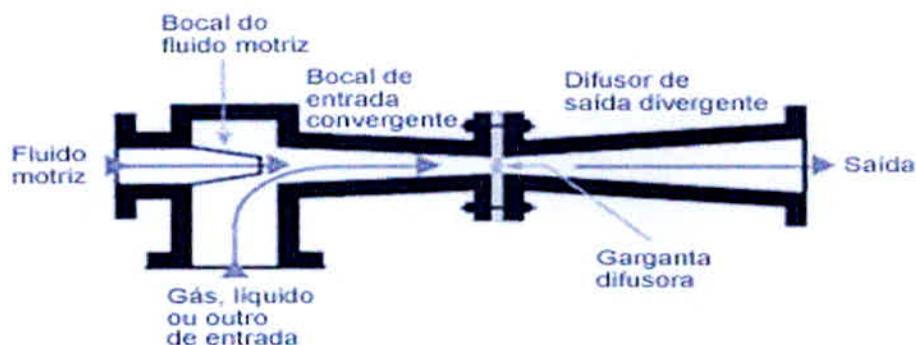
Figura 13- Termocompressão



Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.14)

Este dispositivo produz um efeito Venturi, onde o fluido do ejetor sob alta pressão é convertido em um jato de alta velocidade na garganta do bocal, o que cria uma baixa pressão nesse ponto. A baixa pressão conduz o fluido de sucção para o bocal, onde ele se mistura com o fluido motriz, resultando em uma mistura de vapor de pressão intermediária. A quantidade de vapor reciclado é uma função do projeto do ejetor, da pressão do vapor do motor e da pressão do vapor do evaporador. Uma desvantagem dos sistemas ejetores de vapor é que o vapor do motor é, muitas vezes, contaminado por impurezas presentes no vapor do evaporador.

Figura 14- Injetor de vapor.



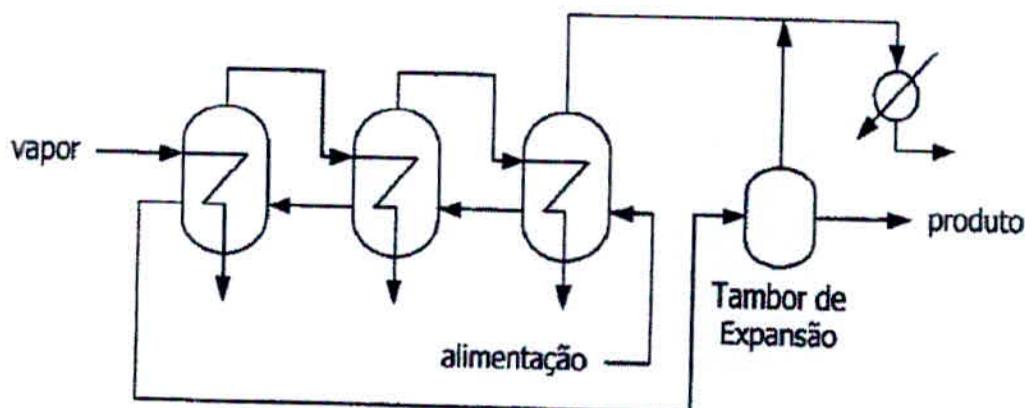
Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.15).

#### 4.4 Tambores de expansão

Também denominados tambores de “flash-coolers”, consistem em vasos sob vácuo onde sem nenhuma adição de calor obtém-se uma pequena evaporação de água. O calor necessário para essa evaporação é proveniente do calor sensível resultante do resfriamento da solução. É necessária, assim, que a corrente de alimentação do tambor de expansão esteja em uma temperatura superior à temperatura de ebulição da solução na pressão do equipamento.

Normalmente, os tambores de expansão são utilizados após o último efeito e o vapor vegetal resultante desde equipamentos segue para o condensador e sistema de vácuo. No caso de arranjo do tipo alimentação reversa, a inclusão de um tambor de expansão é particularmente interessante, já que em temperatura maior, é possível converter maior quantidade de calor sensível em latente através do resfriamento desta corrente.

Figura 15- Evaporador com tambores de expansão.



Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.32).

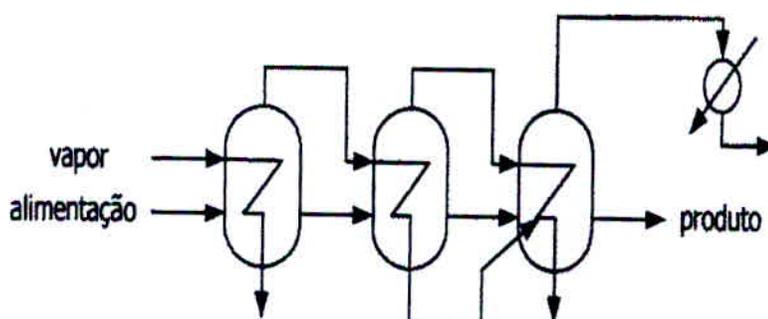
#### 4.5 Aproveitamentos de condensados

É uma forma muito simples de se extrair uma pequena quantidade de calor residual existente nas correntes de condensado. Como na grande maioria dos equipamentos de uma indústria química que não requerem temperaturas de sobremaneira elevadas, o meio de aquecimento dos evaporadores é vapor saturado. O vapor saturado cede calor latente deixando o equipamento como líquido saturado, comumente denominado condensado.

O condensado proveniente da condensação do vapor vivo é denominado “primeiro condensado” e é retornado para a caldeira pelas linhas de retorno de condensado. As correntes de condensado provenientes da condensação do vapor vegetal normalmente arrastam consigo impureza existente no líquido sendo concentrado e por esta razão não se recomenda seu envio para caldeira. Estes condensados são denominados de segundo condensado.

Como forma de se dar um melhor aproveitamento térmico ao segundo condensado, a opção recomendada é misturar o condensado de um efeito com o vapor alimentado ao próximo efeito. Como esta corrente de condensado se encontra numa pressão superior ao do vapor, o condensado sofre uma expansão adiabática. Como consequência desta expansão, uma pequena quantidade de vapor adicional é formada e é misturada com o vapor vegetal e assim aproveitada como meio de aquecimento do efeito seguinte.

Figura 16- Evaporador com aproveitamento do “segundo” condensado.



Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.19).

## 5 SISTEMA DE ECONOMIA NA EVAPORAÇÃO

Os métodos para a conservação de energia nos sistemas de evaporação baseiam-se juntamente no aproveitamento de calor contido no vapor extraído do alimento.

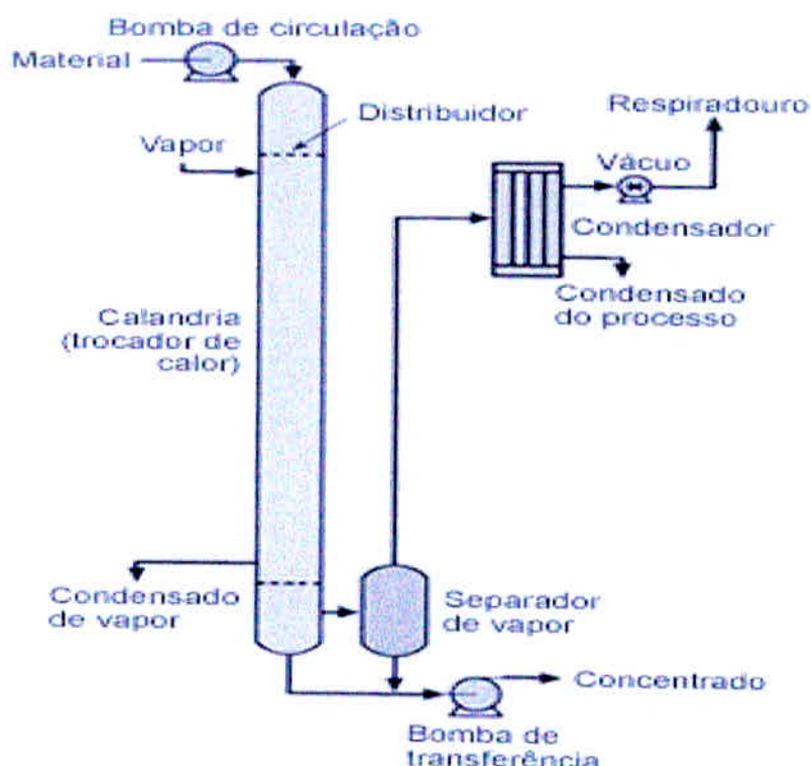
Uma série de medidas consideradas de cunho tecnológico podem ser aplicadas visando evitar perdas, reduzir consumo de energia e quantidade de resíduos, consumo de energia e quantidade de resíduos gerados num processo de produção. Estas medidas podem consistir em alterações do processo, que podem mudar as condições operacionais das plantas.

Tendo em vista que evaporadores são grandes consumidores de energia uma das maneiras mais usuais e a aplicação de mais efeitos no processo, levando em consideração o produto a ser evaporado.

### 5.1 Sistemas de um efeito

Neste tipo de evaporador também chamado de simples efeito, o vapor liberado da concentração isto é, não é reaproveitado para um pré-aquecimento do alimento. Veja o esquema:

Figura 17- Evaporador de um efeito



Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.27)

Um sistema de evaporador industrial simples contém o seguinte:

- Calandria ou trocador de calor, que transfere energia de fluxo-fonte para líquidos com conteúdo de sólidos, elevando a temperatura do fluido para o ponto de ebulição.
- Circulação, ou alimentação, bomba, que alimenta o trocador de calor do evaporador.
- Distribuidor, que distribui alimentação ou líquido circulante uniformemente entre as faces das folhas de tubo dos trocadores de calor do evaporador tubular, garantindo que as superfícies dos tubos alimentados por gravidade fiquem completamente molhadas.
- Bomba de transferência, que movimenta o líquido contendo sólidos enriquecidos do trocador de calor do evaporador.
- Separador de vapor, que separa o vapor da água do líquido com sólidos enriquecidos.
- Condensador, que remove energia do evaporador por meio da transferência de calor com outro líquido.
- Fonte de vácuo, que remove componentes não condensáveis do vapor.

O projeto de um evaporador simples é mostrado na Figura 17, onde cerca de uma unidade de vapor é condensada na concha do trocador de calor, transferindo o calor de condensação para o alimentador localizado nos tubos, evaporando uma unidade de água. Quando a temperatura do alimentador fica abaixo do ponto de saturação, é preciso energia adicional para levar o líquido ao ponto de ebulição à pressão do sistema. O vapor produzido no evaporador flui através do separador, removendo líquido arrastado antes de condensar e transferir a energia para refrigerar a água, com o produto concentrado bombeado para armazenamento. A condensação de vapor não contaminada é devolvida à caldeira para reutilização. Juntos, os componentes são tratados como um "efeito" evaporador.

Para que ocorra a transferência de energia, deve existir um diferencial de temperatura em toda a área da superfície de transferência de calor. Como o vapor e o produto são predominantemente água, um diferencial de temperatura deve ser acompanhado por um diferencial de pressão correspondente, conforme ilustrado na Figura 17.

A eficiência do sistema de evaporador simples na Figura 17 resulta em cerca de uma unidade de vapor removendo uma unidade de vapor de água com uma quantidade praticamente igual de energia transferida para a água de resfriamento.

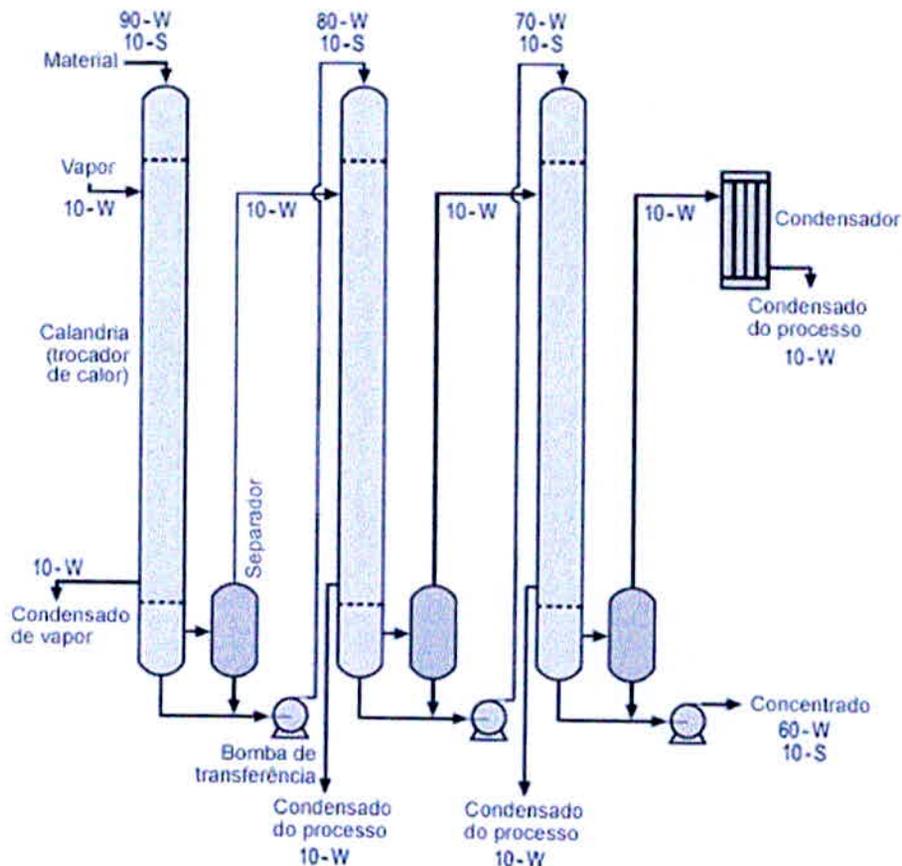
## 5.2 Sistema de múltiplos efeitos

O vapor produzido pelo produto contém consideráveis quantidades de energia que pode ser recuperada parcialmente através da alimentação de vários estágios em série e com pressões internas decrescentes. O vapor produzido no primeiro estágio é usado para evaporar o líquido parcialmente concentrado no segundo estágio ( que tem o ponto de ebulição abaixo da temperatura do vapor devido a menor pressão), e assim por diante. Podem-se usar muitos efeitos em série, sendo o fator econômico e o ponto de ebulição é o mais elevado.

O vapor de caldeira é alimentado no primeiro estagio onde a pressão é o maior de todos os outros efeitos e o ponto de ebulição é o mais elevado.

Os efeitos ou os evaporadores são fabricados de tal forma que a interconexão entre dois deles é apenas um arranjo de tubulações, tendo maleabilidade para adição ou subtração de um ou mais efeitos, se necessário.

Figura 18- Evaporador com três efeitos



Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.28)

Conforme se vê nessas figuras, os efeitos adicionais do evaporador removem mais água por unidade de vapor fornecida e melhoram a eficiência do sistema. A partir disso, parece que os sistemas de evaporação podem ser infinitamente eficientes por meio da adição de efeitos, mas os parâmetros de concepção e operação estabelecem o contrário. Os problemas críticos incluem.

- A temperatura mínima de condensação do vapor final na prática, que é uma função da temperatura de resfriamento da água.
- A temperatura máxima lateral prática do produto no primeiro efeito, que é uma função da estabilidade térmica e o potencial de contaminação do alimento.
- O diferencial de temperatura na prática em efeitos individuais, considerando os parâmetros operacionais, como contaminação da área de superfície da transferência de calor e elevação do ponto de ebulição do produto e frequência de limpeza.

Idealmente 1 Kg de vapor poderá evaporar 1 Kg de água em todos os efeitos de tal forma que o peso de vapor obtido por peso vapor da caldeira seja igual em todos os efeitos do evaporador. Na prática o consumo de vapor é um pouco maior por causa das perdas de calor, (Quadro 1).

Deve-se frisar, entretanto, que as instalações de múltiplos efeitos não têm maior capacidade, mais, sim um menor custo de energia térmica (combustível).

Quadro1 – Consumo de vapor da caldeira em função do número de efeitos.

<b>Efeitos</b>	<b>Proporção</b>	<b><u>Kg vapor usado</u> Kg vapor obtido</b>
1	(1:1)	1,0
2	(1:(1+1))	0,5
3	(1:(1+1+1))	0,33
4	(1:(1+1+1+1))	0,25

Fonte: (FRANCO MAX, 2001, p.21)

Os evaporadores de efeitos múltiplos não são recomendáveis para a concentração de produtos muito sensíveis ao calor em virtude da temperatura relativamente alta requerida no primeiro estágio. O uso de pressões muito baixas, para estes produtos, não é recomendado devido o alto investimento inicial ( linha e bombas muitos exageradas), problemas com a transmissão de calor ( alta viscosidade ), vapor a baixa temperatura ( entre os efeitos ),

impossibilidade de usar a temperatura maior que o ponto de ebulição da água a 1 atm (aquecimento localizado).

O balanço econômico para se determinar o número de estágios depende de vários fatores, entre eles citamos o custo do combustível, o investimento inicial e a manutenção do evaporador. Quando o preço do combustível é relativamente alto, um número maior de estágios seria mais econômico, e vice e versa.

O quadro 2 mostra a quantidade aproximada de vapor usado para evaporada 1 kg de água do produto em função do número de efeitos.

Quadro 2 – Quantidade aproximado de vapor usado para 1 kg de água do produto

<b>N. de efeitos</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Média</b>
1	1,33-1,00	1,17
2	0,63-0,50	0,57
3	0,40-0,34	0,37
4	0,30-0,26	0,28
5	0,24-0,22	0,23
6	0,20-0,18	0,19
7	0,18-0,16	0,17

Fonte: ( FRANCO MAX, 2001, p.22 )

Por conveniência de fabricação, impõe-se que as áreas dos trocadores de calor dos efeitos sejam iguais, observando-se praticamente que, com isso, as quedas de pressão entre os estágios são praticamente constantes. Desta forma, é possível determinar a temperatura de ebulição de cada estágio. Porém, os coeficientes de transmissão de calor são diferentes nos distintos efeitos, tornando-se necessário então que haja uma correção de temperatura em cada estágio para manter a mesma área de troca de calor. Desta forma, mantém-se aproximadamente constante a carga de calor de cada estágio.

## 7 CONCLUSÃO

Cada dia que passa na indústria de um modo geral, temos que procurar recursos novos com tecnologia avançada para que possamos ter um produto final de altíssima qualidade e com um preço competitivo de mercado, com o aumento de produtos industrializados principalmente voltado ao setor alimentício, temos que cada vez mais procurar aumentar a produção e diminuir os custos no processo de fabricação.

O trabalho teve como objetivo apontar o quanto devemos economizar quando utilizamos mais efeitos em um processo de evaporação, quando um evaporador simples efeito é usado, o vapor liberado líquido em ebulição é condensado e eliminado. Esse método é chamado de evaporação de um único efeito e embora permute uma construção simples, não utiliza eficientemente o vapor de aquecimento. Para evaporar 1 Kg de água de uma solução, são precisos 1 a 1,3 Kg de vapor de caldeira.

Se o vapor produzido em um evaporador é conduzido à câmara de vapor de aquecimento de um segundo evaporador e se o vapor aqui produzido é depois enviado para um condensador, a operação torna-se de duplo efeito. O calor do evaporador original é reutilizado no segundo efeito e a evaporação conseguida por 1 kg de vapor de água alimentando no primeiro efeito é aproximadamente duplicada. O método geral para aumentar a evaporação por kg de vapor de caldeira, usando-se uma serie de evaporadores entre o fornecimento inicial do vapor e o condensador, é chamado evaporação de múltiplo efeito. Com isso a eficiência térmica do evaporador aumenta com o numero de efeitos.

Temos que levar em consideração também que quando aumentamos a quantidade de efeitos não estamos aumentando a sua capacidade, mais sim diminuindo consumo de energia térmica, que no caso utilizamos de vapor proveniente de caldeira, que não é um produto barato de se obter, e que requer uma atenção muito grande durante sua geração devido o seu alto risco de acidentes.

Com a análise de estudos e pesquisa referentes aos evaporadores e que de uma forma geral, entre os sistemas abordados, a aplicação de evaporadores em múltiplos efeitos seria a melhor forma de se obter uma economia de energia térmica, por ter configurações semelhantes entre os efeitos, isso gera um custo menor na fabricação e é de baixíssimo custo de manutenção, desta forma seu custo benefício é considerado muito bom pela análise de especialistas no assunto.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, Adilson José de. **Identificação e Controle de Processos Não Lineares Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2001. 189 p. Tese (Doutorado) – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP.
- ARAUJO, C. **Transmissão de calor**, Rio de Janeiro, Livro Técnicos e Científicos, p. 390, 1978.
- BRANDÃO, S.C.C, **Evaporadores**, Composto e impresso nas Oficinas Gráficas da Imprensa Universitária da Federal de Viçosa, Viçosa. 1985
- DURAND, A. A., **A Shortcut for designing evaporators**, Chemical Engineering, January, p. 123-126, 1996.
- DINNGE, D. F., **How to design for economic evaporation**, Food Engineering, December, p. 51-54, 1975.
- EVAPORADOR, Disponível < [www.procknor.com.br/wp-content/uploads/2010/08/Evaporador-EQP.jpg](http://www.procknor.com.br/wp-content/uploads/2010/08/Evaporador-EQP.jpg)> Acesso em: 10 de setembro 2012.
- FELLS, P. J., **Food processing technology- principles and practice**, Ellis Horwood Limited, Nova York, 1988.
- FRANCO, Max . **Integração energética de sistemas de evaporação localizados abaixo do ponto pinch**, Campinas, SP. 2001.
- KERN, Donald Q. **Processos de Transferência de Calor**. McGraw Hill Book Company, Inc. Companhia Editorial Continental S.A. Mexico. 1999.
- KING, C.J., **Separations processes**, segunda edição, Nova York, McGraw Hill Book Company, 809 p., 1971.
- MACEK, S.J., **Putting a lid on evaporation costs**, Chemical Engineering, December, p. 139-143, 1992.
- MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P., **Unit operations of chemical engineering**, 4 edition, Nova York, McGraw-Hill Book Company, 960p., 1985.
- PIMENTA, Pedro Correia Cravo. **Estudos de Simulação Assistidos por Computador: Desenvolvimento e Testes de Estratégias Integradas a Evaporadores de Duplo Efeito**. 1996. 217 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal.

**WORRALL, G. F. P., Mechanical vapour recompression conserves energy in citrus juice concentration, Food technology, May, p. 234-238, 1982.**