

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO – MTA**

**A NOVA GERAÇÃO DE EVAPORADORES E O USO DOS CONDENSADORES
EVAPORATIVOS COMO ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE
ÁGUA NO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO.**

EDUARDO HENRIQUE ALEIXO

Piracicaba

2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO – MTA**

**A NOVA GERAÇÃO DE EVAPORADORES E O USO DOS CONDENSADORES
EVAPORATIVOS COMO ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE
ÁGUA NO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO.**

EDUARDO HENRIQUE ALEIXO

Monografia apresentada ao Programa de Pós-
Graduação MTA em Gestão Industrial
Sucroenergética.

Aluno: Eduardo Henrique Aleixo

Orientação: Prof. Cláudio Lopez

**Piracicaba
2012**

*Dedico este trabalho a minha esposa e filhas,
aos meus pais e irmãos, e a toda esta turma
maravilhosa que tive o prazer de conhecer.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família, pelo apoio e compreensão em todos os momentos desta árdua caminhada. Em especial aos meus Pais, pois sem sua ajuda e apoio não seria possível a concretização deste projeto.

Agradeço a minha verdadeira orientadora a Doutoranda e aluna do curso Vanda Renata Reis pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também a todos os amigos e colegas de curso, pelo compartilhamento de experiências, que foram sem dúvida um algo a mais nesta turma.

Ao corpo docente do Curso de Pós-graduação, que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS.....	9
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	10
4. CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

RESUMO

No setor sucroenergético a etapa de evaporação é um dos pontos mais críticos em relação à demanda de recursos hídricos e consumo de vapor de água. Sendo assim, este trabalho buscou demonstrar os tipos de evaporadores existentes na literatura e no mercado, bem como sua eficiência em relação ao consumo de vapor e os tempos entre as paradas. Foi visualizada uma possibilidade de incremento na eficiência de troca térmica das unidades de evaporação existentes, através de retrofit dos evaporadores do Tipo Robert para Falling Film de 2ª Geração. Foram demonstradas as vantagens do sistema de condensação evaporativa frente às colunas barométricas e multijatos amplamente utilizados na indústria sucroenergética, como: dispensa de água de recirculação (já que utiliza parte do próprio condensado do vapor), redução de Make Up (reposição) de água e redução no consumo de energia com bombas de alta potência e que dispensa torres de resfriamento.

Palavras-chave: sustentabilidade, geração de vácuo e múltiplo efeito.

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético no Brasil compreende todas as atividades agrícolas e industriais relacionadas à produção de açúcar, bioetanol e bioeletricidade (SRB, 2012). Este setor está passando por um novo ciclo de crescimento desde meados de 1995, representado na figura 1, devido ao aumento da exportação de açúcar e com uma retomada do crescimento do consumo do etanol a partir de 2001, pela preferência do uso de etanol no carro bicombustível "flexfuel" (ANA, 2009).

Segundo Portal UNICANA (2010) o setor sucroenergético é composto por 420 unidades em operação que movimentam R\$56 Bilhões anuais entre as receitas de produção de cana, açúcar, etanol e bioeletricidade, representando 2% do PIB. Gera 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos, que envolvem, entre outros, 72.000 produtores independentes de cana de açúcar. Sua capacidade de moagem é de 610 milhões de toneladas de cana, que produzem 33 milhões de toneladas de açúcar e 29 bilhões de litros de álcool.

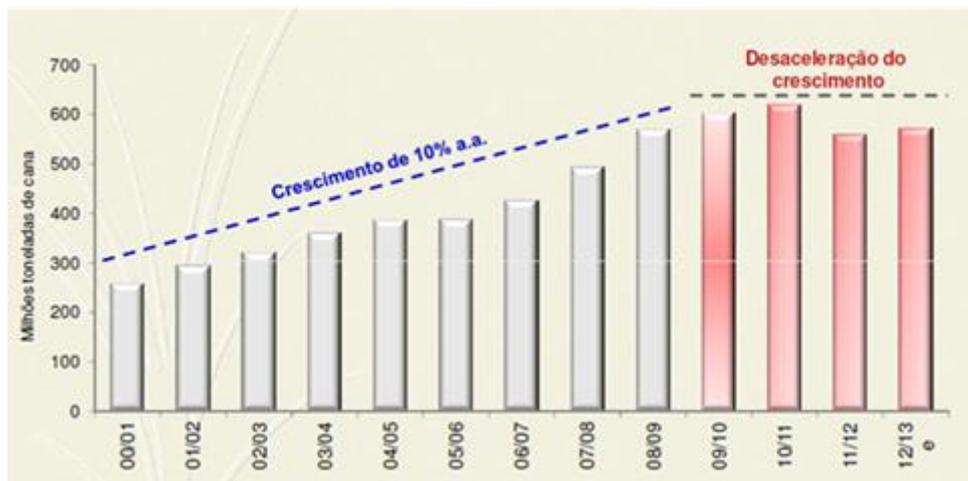


Figura 1. Crescimento do setor sucroalcooleiro (Fonte: ÚNICA e MAPA)

Este setor apresenta uma cadeia produtiva em que várias de suas etapas, se não gerenciadas adequadamente, podem provocar impactos ambientais indesejáveis, principalmente associados ao solo e a água. Em bacias hidrográficas com menos disponibilidade de água, podem ser um competidor expressivo pelos recursos hídricos, com destaque nas regiões em que a cana-de-açúcar necessita de irrigação plena (ANA, 2009)

O uso médio de água para uma usina com destilaria anexa e com um "mix" de produção de 50% de cana para açúcar e de 50% para etanol é de 22 m³/t cana.

Sendo que deste número a fábrica de açúcar demanda o montante de 8,367m³/t de cana ou 37,8% do volume total (ANA, 2009).

A figura 2 representa a demanda de água do processo de fabricação de açúcar.

Setor	Finalidade	Uso Específico	Uso médio	
			[m ³ /t cana]	[%]
Fábrica de açúcar ^(*)	Vapor para evaporação	0,414 t/t cana açúcar	0,207	0,9
	Condensadores/multijatos evaporação	4 a 5 m ³ /t cana açúcar	2,250	10,2
	Vapor para cozimento	0,170 t/t cana açúcar	0,085	0,4
	Condensadores/multijatos cozedores	8 a 15 m ³ /t cana açúcar	5,750	26,0
	Diluição de méis e magas	0,050 m ³ /t cana açúcar	0,030	0,1
	Retardamento do cozimento	0,020 m ³ /t cana açúcar	0,010	0,0
	Lavagem de açúcar (1/3 água e 2/3 vapor)	0,030 m ³ /t cana açúcar	0,015	0,1
	Retentor de pó de açúcar	0,040 m ³ /t cana açúcar	0,020	0,1
Subtotal			8,367	37,8

Figura 2. Demanda de água do processo de produção de açúcar. Em destaque os equipamentos que mais consomem água. (Fonte: ANA, 2009).

Podemos notar na figura 2 que o maior volume de água destinado ao processo de fabricação de açúcar é direcionado para geração de vácuo nos condensadores barométricos e multijatos nos processos de evaporação e cozimento. As águas utilizadas nas colunas barométricas representam demanda considerável e apresentam qualidade superior as demais águas residuárias. Segundo Braile, (1979) esses equipamentos gastam cerca de 35L de água para condensar um quilo de vapor, porém, como os gases são em parte incondensáveis, deve-se fornecer de 40 a 50 L de água por kilo de vapor.

De acordo MAPA (2008), as unidades industriais existentes consumiram o equivalente a 490 milhões de m³ de água e, mesmo que a maioria tenha circuitos de água fechados, o excedente e água residual são aplicados na fertirrigação, sendo misturado à vinhaça. Costume este, restringido pelo alto custo da distribuição da vinhaça como efluente e por atendimento à Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos sobre a cobrança de uso das águas, medidas que vem estimulando usinas a buscar técnicas como de reuso e mecanização.

De acordo com a resolução SMA (2008) pela qual se definem as diretrizes para o licenciamento de empreendimento sucroalcooleiro do Estado de São Paulo, as usinas que estiverem localizadas em áreas classificadas como adequadas para o plantio de cana terão que utilizar 1 m³/ TC e nas áreas

adequadas com limitações e restrição, o uso de água cai para um índice ainda menor que deve ser de no máximo $0,7 \text{ m}^3 / \text{TC}$ (REVISTA ALCOOBRÁS, 2009).

Neste contexto temos uma grande oportunidade de redução do volume recirculado de água que é destinado as colunas barométricas e multijatos, como fonte fria para condensação dos vapores do último efeito da evaporação e cozimento.

Segundo Neto (2012) da empresa LM Engenharia, o condensador evaporativo é um trocador de calor que tem como objetivo a condensação dos vapores de um Evaporador ou Cozedor, provocando um gradiente negativo acentuado na pressão interna (vácuo) do equipamento. Nas mais diferentes indústrias de processo, o Condensador Evaporativo está substituindo o Condensador Barométrico e o Condensador de Superfície devido às seguintes vantagens:

- Não requer água externa, eliminado com isso a necessidade de torres de resfriamento, tubulações de transferência e bombas de grande capacidade;
- Extrema facilidade de operação;
- Grande economia de energia elétrica e manutenção;
- Eliminação da necessidade de tratamento de água, uma vez que o equipamento opera com seu próprio condensado.

Segundo Loffredo (2012) a empresa trabalha com esta tecnologia desde 1980 e possui mais de 60 unidades instaladas em funcionamento em outros setores.

Sendo assim, este trabalho visa demonstrar na literatura, que a utilização de equipamentos como os condensadores evaporativos, pode representar uma fonte real de economia de água de recirculação e de energia elétrica consumida para seu bombeamento.

2. OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi verificar na literatura a produção científica existente sobre as novas gerações de evaporadores e o uso dos condensadores evaporativos para geração de vácuo nos sistema de evaporação de 1990 a 2012.

A pesquisa se propôs em analisar a produção literária em evaporação e teve como recorte temporal o período de publicações científicas brasileiras de 1990 a 2012. Período este, onde constatamos uma grande massificação dos investimentos e a consolidação de um novo marco da indústria sucroenergética.

3.REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Processo de produção de açúcar

Segundo Lopes (2009) a produção de açúcar sob a forma de sacarose cristalizada á partir da cana-de-açúcar é realizada pelas usinas de açúcar cujo processo tecnológico é formado por uma sequencia de operações industriais que resumidamente seriam:

- a) Extrair a sacarose dos colmos de cana;
- b) Purificar o caldo extraído;
- c) Concentrar o caldo por evaporação e cristalizar a sacarose.

Apesar do processo de fabricação ser simples, essas operações quando detalhadas mostram sua complexidade. Dependendo do tipo de açúcar a ser produzido, o processo pode sofrer grande variação no fluxograma industrial, conforme pode ser visto na figura 3.

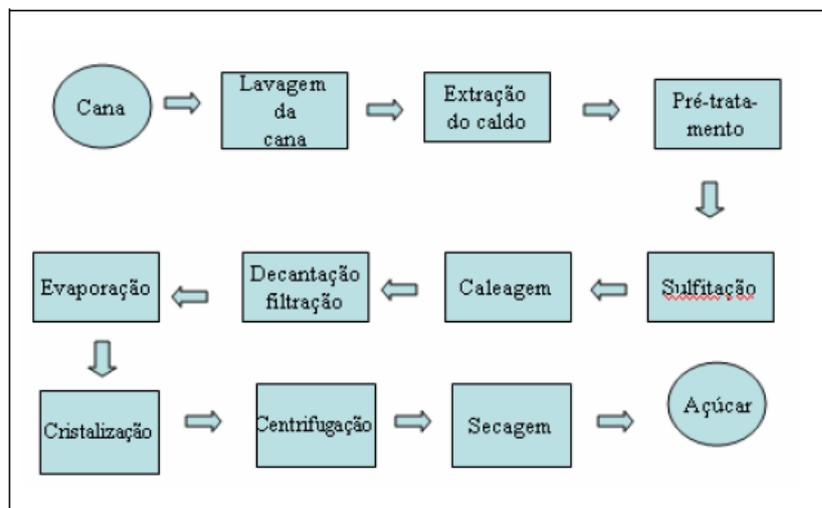


Figura 3. Fluxograma do processo de fabricação do açúcar cristal

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a indústria sucroalcooleira brasileira. A agroindústria da cana envolve etapas, como: produção e abastecimento da indústria com matéria-prima; gerenciamento dos insumos, resíduos, subprodutos e da versatilidade da produção - de açúcar ou álcool; armazenamento e comercialização dos produtos finais. Estas etapas devem ser executadas com o emprego de técnicas eficientes de gerenciamento (EMBRAPA, 2012).

A colheita, carregamento, transporte, pesagem, pagamento da cana pela qualidade, descarregamento e lavagem (Figura 4) são operações determinantes para um bom desempenho industrial. Estas etapas devem ser realizadas em sincronia com as operações industriais para que não ocorra sobreabastecimento, o que demanda armazenamento, com conseqüente queda na qualidade ou falta de cana para a moagem, ocasionando atrasos na produção.



Figura 4. Lavagem da cana-de-açúcar para retirada de impurezas. (Fonte: Embrapa)

Na indústria, a cana pode ter dois destinos: produção de açúcar ou de álcool.

Para a produção de açúcar, as etapas industriais são:

- lavagem da cana;
- preparo para moagem ou difusão (Figura 5);
- extração do caldo: moagem ou difusão;
- purificação do caldo: peneiragem e clarificação;
- evaporação do caldo;
- cozimento;
- cristalização da sacarose;
- centrifugação: separação entre cristais e massa cozida;
- secagem e estocagem do açúcar.



.Figura 5. Cana desfibrada, pronta para a moagem (EMBRAPA)

Segundo a Usina Éster (2011), os principais processos envolvidos na produção de açúcar são:

- Tratamento de caldo

O caldo extraído na moenda, chamado de caldo misto, é um caldo impuro, sendo necessário passar, por um processo de clarificação para retirada de sólidos em suspensão. O caldo é sulfitado e caleado. Este processo é chamado de dosagem. A adição de enxofre e cal facilita a floculação das substâncias coloidais.

Após a dosagem, o caldo é aquecido a 107°C em aquecedores verticais e enviado aos clarificadores que retêm o caldo por aproximadamente 3 horas em regime contínuo. Neste tempo de retenção, ocorrem reações de floculação e precipitação do material em suspensão que são retirados na forma de lodo. O caldo clarificado e limpo segue o processo para evaporação e o lodo irá para filtração à vácuo onde é recuperada a sacarose ainda existente.

- Filtração do lodo

Como o lodo ainda é rico em sacarose, é feita uma filtração nos filtros rotativos à vácuo para succionar o material líquido, chamado de caldo filtrado, que sofrerá novo tratamento de clarificação. O material sólido retido nas telas dos filtros é denominado torta de filtro. Esta torta é enviada à lavoura, sendo utilizada como adubo.

- Caldo clarificado

O caldo clarificado obtido da decantação do caldo é enviado para a evaporação.

- Evaporação

O caldo clarificado com aproximadamente 15°Brix entra em um conjunto de evaporadores de múltiplo efeito para a retirada de maior parte da água, concentrando até cerca de 65°Brix, tomando consistência de um xarope. Este xarope é bombeado aos tachos de cozimento para a cristalização do açúcar.

- Cozimento A

Os tachos de cozimento são equipamentos que continuam a evaporação do xarope, tornando o meio supersaturado dando as condições necessárias à cristalização da sacarose. O produto obtido neste cozimento é a massa A. Esta massa A é uma mistura de cristais de açúcar e o seu correspondente licor-mãe (mel), de onde foi obtida a cristalização do açúcar.

- Cozimento B

No cozimento B é onde formamos os cristais para o cozimento A. Os tachos de cozimento B recebem o mel A e por um processo de nucleação, produz-se os pequenos cristais, de modo controlado e padronizado. Este processo é fundamental na qualidade do produto final, onde todos os cristais são induzidos a uma formação conjunta e uniforme, chamado de sementeamento total. A massa B, da mesma forma que a massa A, é uma mistura de cristais de açúcar e o seu correspondente licor-mãe (mel) de onde foram obtidos os cristais.

- Centrifugação da massa A

A massa A é um produto que contém cristais de aproximadamente 0,5mm envolvidos numa película de mel. Na centrifugação ocorre a separação do mel, denominado mel A, que irá para os tachos de cozimento B, e açúcar propriamente dito, que é enviado ao secador de açúcar.

- Centrifugação da massa B

A massa B é um produto que contém cristais de aproximadamente 0,2 mm e melaço. Na centrifugação, os cristais são separados do mel B (ou melaço) onde o magma (cristais de açúcar B) será utilizado como núcleo para o cozimento A e o melaço é enviado para a fabricação do álcool.

- Secagem do açúcar

Nesta etapa o açúcar passa no secador para a retirada da umidade contida nos cristais. Na saída do secador, o açúcar é enviado por esteiras sanitárias até a moega de açúcar (reservatório próprio para açúcar), de onde é feito o ensacamento.

- Ensacamento

O açúcar é ensacado em sacos de 50 kg ou em contêineres ("big-bag") de 1000 kg.

3.2 Processo de Evaporação

Segundo Delgado (1996), o caldo clarificado que flui continuamente dos decantadores é uma solução diluída, quente, de cor variável entre o amarelo e o âmbar, transparente e geralmente brilhante.

Em função do grau de embebição adotado na moagem da cana, o caldo apresenta-se numa concentração entre 14 a 17° Brix, tal qual à mostrada pelo caldo misto. Nessas condições, o caldo clarificado chega à evaporação, com aproximadamente 83 a 86% de água, a qual deve ser removida, em sua maior parte. Esta remoção de água constitui o objetivo principal da fase de evaporação.

À medida que o caldo clarificado vai sendo liberado pelos decantadores, este é encaminhado para um reservatório, onde através de bombeamento chega ao primeiro vaso de evaporação numa temperatura ao redor de 95°C. Durante o trajeto do caldo clarificado do Dorr para a caixa de recepção e desta para a calandra do 1º vaso de evaporação ou do pré-evaporador, pode ocorrer perda de mais algumas calorias.

A rapidez das operações, a perfeição dos isolamentos do Dorr, da caixa de recepção e das tubulações, entre outros fatores, podem contribuir para a

manutenção da temperatura do caldo clarificado em níveis mais elevados e desejáveis.

De qualquer forma, é interessante que esta temperatura sempre seja alta ou tão próxima, quanto possível da temperatura do vapor de alimentação do primeiro vaso de evaporação. Estando o caldo a uma temperatura mais baixa, parte do calor latente do vapor é consumida para elevar o caldo à condição de ebulição. Se o caldo entra no evaporador a uma temperatura mais alta do que o ponto de ebulição, ocorre o “flash” ou o que chamamos de auto-evaporação, sendo que a quantidade de calor requerida, para evaporar um quilograma de água é menor do que o equivalente de seu calor latente. Algumas usinas passam o caldo clarificado em aquecedores antes da entrada no pré-evaporador ou 1º vaso da evaporação elevando, assim, a sua temperatura.

Concentrar o caldo clarificado até a cristalização da sacarose não é aconselhável - apesar de ser possível – devido a razões de ordem técnica e econômica citadas abaixo:

- a. Maior consumo de vapor;
- b. Difícil manuseio da massa cozida;
- c. Necessidade de maior número de equipamentos;
- d. Necessidade de maior número de operadores.

Diante disso, a concentração do caldo clarificado até a fase de massa cozida é feita em dois estágios:

- a. Evaporação propriamente dita;
- b. Cozimento.

A evaporação compreende a concentração do caldo clarificado até a obtenção de um líquido denso, de cor marrom ou caramelo, ainda não apresentando qualquer sinal de sacarose cristalizada, denominado xarope.

O segundo estágio de concentração, ou seja, o cozimento, tem início um pouco antes dos cristais aparecerem no xarope, devendo-se dar por encerrado quando máxima obtenção de sacarose cristalizada.

O produto final dessa operação é a massa cozida, formada por uma mistura de cristais de sacarose e mel. Parte dos não açúcares permanecem no mel juntamente com uma parte de sacarose. A separação dos cristais ocorre posteriormente por centrifugação.

Segundo se sabe, o ponto de cristalização da sacarose se encontra

entre os 70 e 80° Brix (41 a 42° Bé). E, no primeiro estágio, pela evaporação da maior parte de água, é possível obter xaropes de até 72 a 75° Brix, concentração esta que poderia aumentar a eficiência do estágio seguinte acelerando-o, evidentemente. Entretanto, na prática, uma série de conveniências faz com que se obtenha na fase de evaporação xaropes menos concentrados. Entre essas, destacam-se:

- a. Facilidade na obtenção de pés de cozimento;
- b. Melhores condições para a condução do cozimento, pois se tem um melhor controle no crescimento dos cristais do pé inicial;
- c. Necessidade de dissolução de certos cristais (falsos cristais ou ainda “poeira”).

Segundo se tem observado, é habitual encontrar nas usinas de açúcar os seguintes critérios na evaporação do caldo.

- a. Concentração do caldo para obter o açúcar demerara: 60 a 70° Brix ou 32 a 37 °Bé.
- b. Concentração do caldo para obter o açúcar branco de consumo direto: 50 a 60° Brix ou 37 a 32 °Bé.

Contudo, essas concentrações estão sendo constantemente influenciadas pelo Brix inicial do caldo clarificado, pressão de vapor, taxa de incrustação, cuidados na operação dos evaporadores, dentre outros fatores, observando-se sempre os mais altos valores no início da semana quando os aparelhos estão limpos.

3.2.1 Desenvolvimento da Evaporação

Segundo WEBRE (1962), Norbert Riillieux foi o primeiro estudioso da evaporação a definir os seus princípios básicos.

Entretanto, antes dos trabalhos de Riillieux divulgados em 1843, o processo de evaporação e concentração do caldo, até a condição de massa cozida era levado a efeito em uma só etapa e conduzido em aparelho de baixo vácuo. A menor unidade conhecida e em uso era o cozedor ou tacho **HOWARD**, o qual era simplesmente um depósito com uma camisa de vapor, tal e qual se conhecem atualmente.

Provavelmente, antecedendo os tachos de **HOWARD**, a evaporação se fazia em tachos abertos, de ferro ou cobre aquecidos a fogo direto. Em sequência, esses tachos passaram a ser aquecidos a vapor; os mesmos eram construídos de camisas de paredes duplas.

Em qualquer desses casos, o consumo de combustível, lenha, carvão ou vapor era sempre muita elevado e os riscos de inversão da sacarose, e de caramelização, etc., não eram menores.

A primeira patente de Rillieux mostra dois tachos de **HOWARD**, conectados em série e foi com esses equipamentos que se conduziram as primeiras experiências. O primeiro tacho de **HOWARD** era um evaporador, fornecendo vapores ao segundo tacho, onde se elaborava a massa cozida.

A segunda patente de Rillieux (1948) refere-se ao aproveitamento dos vapores dos diferentes tachos. Rillieux, nesta ocasião, mudou o desenho dos vasos de camisas duplas, passando a trabalhar com recipientes tubulares. O equipamento era composto de três ou quatro recipientes cilíndricos, construídos em chapas de ferro, dispostos em posições paralelas. O vapor circulava de um vaso a outro por meio de tubos, controlados por válvulas. O primeiro equipamento consistia de um evaporador a duplo-efeito e um tacho a vácuo, operando com vapores do primeiro vaso do conjunto. De forma similar um aparelho de quatro vasos consistia de três vasos ou de um tríplice-efeito e um tacho à vácuo, operando com os vapores do primeira vaso. Do mesmo modo, a combinação de cinco vasos seguia o mesmo critério de utilização.

De acordo com o conceito atual de evaporação, este esquema de concentração de caldo constituía o segundo princípio de Rillieux.

Após as experiências deste notável técnico, outros trabalhos foram realizados com vista à evaporação. Assim, é que em 1882 e 1889, **LEKA** e **PAULY** introduziram antes do conjunto de evaporação um vaso que era chamada de pré-evaporador. Segundo **FERNANDEZ CABAL** (1966), esta técnica foi adotada com sucesso por muitas usinas de açúcar.

Em 1904, o evaporador Kestner foi experimentado com sucesso na indústria açucareira. Esses vasos frequentemente funcionavam com pré evaporadores, pois o pequeno tempo de permanência do caldo no conjunto tubular permitia que se operasse à elevada temperatura com um mínimo de risco de caramelização e perdas por inversão.

Desde então, os estudos para o aperfeiçoamento do sistema da evaporação do caldo de cana, os progressos verificados, apesar de não se constituírem em modificações radicais de operação têm sido a consolidação dos postulados de RILLIEUX, conhecidos por “Princípios da Evaporação”.

3.2.2 Princípios da Evaporação em Múltiplo-efeito

As bases fundamentais da evaporação do caldo clarificado em aparelhos de múltiplos-efeitos são, segundo WEBRE, devidas a RILLIEUX, constando de três princípios:

- Primeiro princípio

“Em um evaporador de múltiplo-efeito, cada quilograma de vapor, usado no primeiro vaso, evaporará tantos quilogramas de água quantos forem os vasos”.

Diante deste princípio, tem-se o seguinte:

- a. No simples-efeito: 1 kg de vapor evapora 1 kg de água;
- b. No duplo-efeito; 1 kg de vapor evapora 2 kg de água;
- c. No tríplice-efeito: 1 kg de vapor evapora 3 kg de água;
- d. Quadrúplo-efeito: 1 kg de vapor evapora 4 kg de água;
- e. Com n vasos: 1 Kg de vapor evapora n kg de água.

Verifica-se, por este princípio, que o consumo de vapor se restringe apenas ao primeiro vaso e que quanto maior for o número de vasos, tanto mais econômica será a evaporação. Entretanto, na prática, o número de vasos se restringe a 4 ou 5 no máximo em virtude de certas considerações técnicas e econômicas.

Entretanto, a aplicação deste primeiro princípio é apenas uma louvável aproximação do estágio atual da evaporação em múltiplo-efeito. No estabelecimento deste princípio, RILLIEUX não considerou o efeito da temperatura do caldo de entrada em cada vaso. Como já foi salientado antes, se o caldo de entrada no primeiro vaso estiver na temperatura correspondente a seu ponto de ebulição, resultará uma evaporação de 1 kg de água por kg de vapor. Entretanto, se a temperatura do caldo for inferior ao seu ponto de ebulição, há necessidade de consumo de vapor adicional. Neste caso, a evaporação do primeiro vaso será menor do que 1 kg de água por kg de vapor usado. Por outro lado, se a temperatura de alimentação do caldo estiver acima do valor atribuído ao seu ponto de ebulição,

ocorrerá um “flash” e a evaporação por kg de vapor será maior do que a unidade.

Nos evaporadores, a partir do segundo vaso, sempre ocorre um “flash”, pois as temperaturas de ebulição diminuem gradativamente alcançando um mínimo no último efeito. Este fenômeno ocorre em razão do aumento da condição de vácuo.

Para o caso de um quádruplo-efeito, segundo WEBRE, as quantidades de evaporação obedecem à aproximadamente os seguintes dados:

Quadro 1.

Primeiro vaso	100,0%
Segundo vaso	107,5%
Terceiro vaso	115,0%
Quarto vaso	121,0%

Quadro 1: Percentual de evaporação nos quatro efeitos.

Na prática açucareira, como a temperatura do caldo de alimentação do primeiro vaso é sempre inferior à de seu ponto de ebulição, a eficiência do primeiro vaso nunca chega a 100%. Daí, o princípio de **RILLIEUX** ser válido apenas para o caso em que a temperatura do caldo admitido em cada vaso corresponder ao seu ponto de ebulição.

- Segundo princípio

“A extração de vapor de qualquer unidade de um evaporador de múltiplo-efeito para ser usado em outro setor da fábrica conduz a uma economia que será igual ao nº de quilogramas de vapor assim extraído, dividido pelo nº de vasos do conjunto e multiplicado pelo nº de ordem que o corpo ocupa”.

Considerando **W** o peso de vapor. **M** o nº de vasos e **N** o nº de ordem que o vaso ocupa no conjunto de evaporação, a economia de vapor **E** será igual a:

$$E = W \cdot \frac{N}{M}$$

Por exemplo, a retirada de uma unidade de vapor do primeiro vaso de um quádruplo-efeito implica numa economia equivalente a 1/4 do vapor usado, ou seja:

$$E_{1^{\circ} \text{ vaso}} = 1 \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{4}$$

Do mesmo modo, para os outros vasos, tem-se os seguintes índices de economia:

$$E_{2^{\circ} \text{ vaso}} = 1 \cdot \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

$$E_{3^{\circ} \text{ vaso}} = 1 \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4}$$

$$E_{4^{\circ} \text{ vaso}} = 1 \cdot \frac{4}{4} = 1$$

A prática de utilizar vapores do primeiro, do segundo vaso, ou até mesmo do vapor que irá ao condensador, para aquecimento parcial do caldo ou para outros fins, constitui uma aplicação deste princípio. Entretanto, como a temperatura do vapor decresce nos últimos vasos, a prática de sangria do vapor dessas unidades não é muito observada pelas usinas de açúcar.

- Terceiro princípio

“Em todo aparelho no qual se condensa vapor, é necessário extrair continuamente a acumulação de gases incondensáveis que, por via de regra, ficam, internamente, próximo à superfície superior da calandra.”

Em atenção a esse princípio, os construtores de equipamentos instalam nos evaporadores dispositivos mecânicos para a extração dos gases incondensáveis, conforme se verá oportunamente.

3.2.3 Evaporação do Ponto de Vista Termodinâmico

Do ponto de vista termodinâmico, o princípio sob o qual se apoia o emprego do vapor na evaporação do caldo de cana é o da transmissão do calor.

Quando o vapor toca a superfície que está a uma temperatura menor do que a sua, ele aquece o líquido que está do outro lado da superfície. Em consequência disso, o vapor condensa-se e cede o seu calor latente. Assim, o

trabalho do evaporador está baseado, em todos os vasos, na transferência do calor latente do vapor para o caldo em ebulição.

O vapor é a água em estado gasoso a uma pressão maior do que a atmosfera. Nas usinas de açúcar, o vapor é obtido a partir da água em caldeiras especiais, utilizando-se de bagaço como combustível. Por outro lado, gases são vapores obtidos a uma pressão menor do que a da atmosfera.

Nos evaporadores de múltiplos-efeitos, vapor é todo aquele que alimenta e que resulta da evaporação do caldo do primeiro vaso, pois neste vaso, a pressão é geralmente superior à atmosférica. Neste vaso, não há ainda a condição de vácuo. Nos demais vasos e a partir do segundo, se tem gases, pois, são produzidas em condição de um vácuo que cresce nas últimas unidades do conjunto de evaporação.

Segundo ALMEIDA (1944), é usual chamar de gases os vapores produzidos nos evaporadores, independentemente da pressão do vácuo interno. Entretanto, esta terminologia não é rigorosamente seguida na prática açucareira. O termo vapor, ao invés de gases, tem sido o mais usual, servindo para expressar o produto das sangrias que eventualmente possam ser feitas nos diversos vasos de um múltiplo-efeito.

Na figura 6 é apresentado o fluxograma de processamento industrial da etapa de evaporação do caldo clarificado para obtenção do xarope na faixa de 60 a 65°Brix em conjuntos de evaporação de múltiplos efeitos.

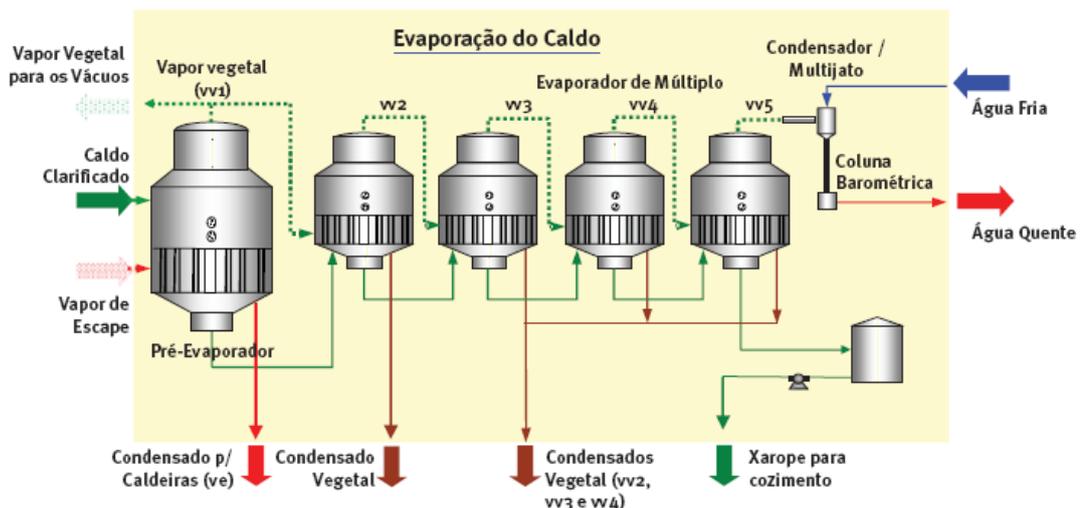


Figura 6 – Processo de evaporação do caldo.

Conforme o esquema pode-se sangrar vapor das caixas de evaporação para aquecimento de caldo e para o cozimento. Este sistema tem uma grande eficiência energética, pois o vapor produzido na primeira caixa é utilizado para evaporar da segunda, assim sucessivamente até o último efeito, onde o vapor é condensado nos multijatos ou condensadores barométricos.

3.2.4 Tipos de Evaporadores

Além dos evaporadores clássicos das usinas de açúcar, existem outros tipos de desenhos semelhantes, mas que apresentam algumas diferenças que são merecedoras de discussão.

Em geral, essas modificações, têm sido feitas em relação:

- a) Construção da calandra;
- b) Comprimento do tubos;
- c) Distribuição do vapor;
- d) Prevenção de arrastes;
- e) Circulação do caldo;
- f) Aproveitamento das águas condensadas, etc.

Dentre os tipos de evaporadores que tem chamado à atenção dos estudiosos do assunto destacam-se os seguintes:

- 1 -Evaporador de calandra flutuante;
- 2 -Evaporador Kestner;
- 3 -Eveporador compacto;
- 4 -Evaporador de WEBRE;
- 5 -Evaporador “*Falling Film 1° Geração*”;
- 6 -Evaporador “*Falling Film 2° Geração*”;
- 7- *Evaporador Névoa Turbulenta Descendente (NTD).*

3.2.4.1 Evaporador de Calandra Flutuante

Segundo FERNANDEZ CABAL (1966), este evaporador de calandra flutuante, conhecido pelo nome de “Segura” foi projetado com vista à:

- a- Eliminação mais rápida da água condensada;
- b - Atenuação do efeito das incrustações;
- c - Redução das resistências térmicas das películas de caldo e de vapor.

Como foi visto em itens anteriores, os fatores mais importantes com respeito à transmissão de calor são:

- a - Película de água condensada que o vapor deposita na parede externa dos tubos;
- b - Incrustações formadas no interior dos tubos;
- c - Película de caldo que se move no interior dos tubos;
- d - Presença de gases incondensáveis.

Segundo o autor deste projeto de evaporador, a velocidade de vapor nesses evaporadores na parte inferior da calandra nunca chega a zero, pois, pelo sistema de distribuição axial, há sempre um excesso de vapor no vaso.

Este fato é comprovado pelas velocidades médias teóricas do vapor na calandra, dadas em m/s para um evaporador convencional e para o desenho “Segura”, segundo KRIJGER (XII Congresso de Tecnólogos Açucareiros, efetuado em Porto Rico), para 1.000 TCD, inseridas no Quadro 2, as velocidades na parte superior e interior de cada calandra são as pertinentes ao Quadro 3.

Quadro 2. Velocidades de vapor nos evaporadores convencionais e desenho “Segura”.

Calandra	Convencional	“Segura”
I	0,73 m/s	0,84 m/s
II	0,85 m/s	1,95 m/s
III	1,08 m/s	1,95 m/s
IV	1,03 m/s	4,16 m/s

Quadro 3. Velocidades na parte superior e inferior dos evaporadores

Calandra	Convencional		"Segura"	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
I	1,46	0,0020	1,58	0,10
II	1,70	0,0016	2,00	0,30
II	2,16	0,0014	3,00	0,90
IV	3,06	0,0012	5,72	2,60

- **Detalhes de construção do evaporador "Segura".**

Conforme a Figura 7, a parte inferior do evaporador "Segura" é constituído essencialmente por um envolvente e por uma calandra flutuante entre a calandra propriamente dita e a chapa envolvente são soldadas algumas chapas metálicas que têm por finalidade orientar o fluxo de circulação de caldo.

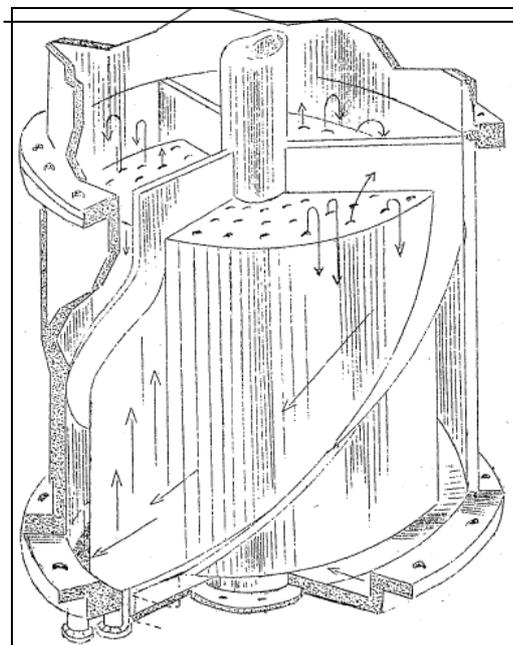


Figura 7- Calandra do evaporador "Segura" -(tipo flutuante)

Neste tipo de calandra, a circulação do caldo se realiza pelo interior dos tubos, de baixo para cima, sendo que o caldo que flui de cada seção tubular da calandra, delimitada externamente pela chapa defletora é obrigado a passar à seção seguinte. Nessas condições, o caldo fica, assim condicionado a percorrer

vários compartimentos, podendo adquirir, em razão disso, uma maior velocidade de circulação. Os efeitos desta maior velocidade de circulação são atribuídos ao a um aumento na transmissão de calor e a uma formação mais lenta de incrustação.

Conforme mostra a Figura 8, a entrada de vapor é axial, realizada pela parte central da calandra em um setor desprovido de tubos. Nesta forma de entrada de vapor tem-se uma distribuição radial do mesmo entre os tubos.

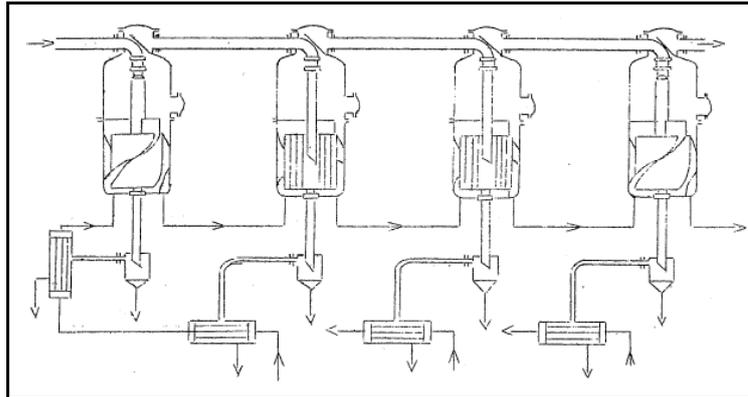


Figura 8- Distribuição de vapor e sistema de extração de condensados no evaporador “Segura”

A água condensada se extrai na parte inferior dos tubos por um sistema especial de drenagem. Neste esquema de evaporador, há a previsão de aproveitamento do “flash” das águas condensadas para utilização em aquecedores (Figura 153).

As vantagens desse evaporador empregadas pelo autor, são as seguintes:

- a - Maior velocidade de circulação de caldo;
- b - Formação de película mais fina de condensado;
- c - Maior transmissão de calor em consequência da maior velocidade de circulação de caldo;
- e - Melhor distribuição do vapor nas superfícies tubulares.

3.2.4.2 Evaporador Kestner

O evaporador Kestner caracteriza-se por possuir um feixe tubular vertical, variando de seis a sete metros de comprimento. O coeficiente global de transmissão de calor neste evaporador é bem mais elevado da que nos evaporadores clássicos, podendo chegar a 3.000 Kcal/m²/h/°C

Este coeficiente elevado é devido a uma maior predominância do

vapor, resultante da ebulição do líquido nos tubos. Ao subir o líquido pelo tubo, as bolhas de vapor aumentam rapidamente de tamanho e a partir de determinada altura forma-se uma bolha única, chegando a atingir quase que o diâmetro do tubo (Figura 9).

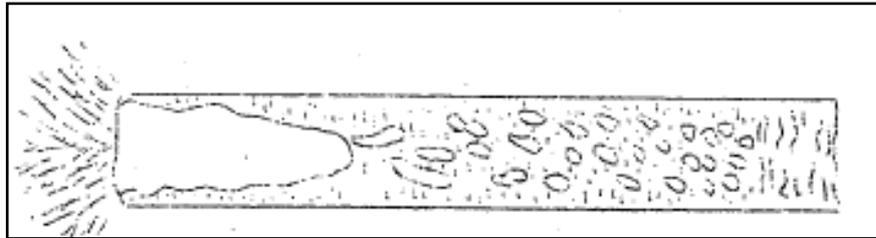


Figura 9 – Demonstração do tubo.

O grande volume de vapor gerado, adquirindo uma maior velocidade ascensional, arrasta uma fina película de caldo que se adere às paredes do tubo. Segundo **SALMONI** (1966), foram observadas velocidades de arrastamento de até 100 m/s.

Em razão dessas elevadíssimas velocidades, o coeficiente de película do líquido (h_2) assume valores muito maiores do que os atribuídos aos evaporadores de calandra.

- **Comprimento dos tubos**

Os evaporadores Kestner são têm sido projetados para utilizar-se de tubos com sete metros de comprimento. Contudo, segundo **HUGOT, CLAASSEN** (1969) demonstrou que os coeficientes de transmissão de calor assumem valores máximos quando o comprimento dos tubos é de cinco metros.

- **Diâmetro dos tubos**

Segundo **HUGOT**, o diâmetro dos tubos, nesses evaporadores, varia de 27 a 38 mm.

- **Nível de caldo**

Em razão da grande velocidade de circulação do caldo, a pressão

hidrostática tende a diminuir no evaporador Kestner. A pressão que uma coluna de grande bolhas de vapor (princípio de funcionamento desses evaporadores) exerce sobre o fundo é de menor valor do que a pressão exercida por uma coluna líquida contínua, na qual as pequenas bolhas de vapor dispersas não são suficientes para interromper o efeito da pressão. Diante disso, o nível ótimo do caldo nos evaporadores Kestner é menor do que o atribuído aos evaporadores clássicos (30 a 40% do comprimento dos tubos). Nos Kestner, este nível deve ser de aproximadamente 20% do comprimento dos tubos.

- **Instalação dos evaporadores Kestner**

Segundo o que se tem divulgado Conforme pesquisas encontradas na literatura, um corpo do evaporador Kestner se pode-se montar de duas maneiras distintas diferentes do ponto de vista de circulação de vapor e de caldo. Na indústria de beterraba, tem-se usado o evaporador montado num corpo único, ou seja, caixa tubular e câmara de evaporação em sequência, tal quais os vasos clássicos de evaporação (Figura 10). Na Indústria de cana, a câmara de vapor e dispositivo para drenagem de caldo são montados ao lado da calandra tubular (Figura 10).

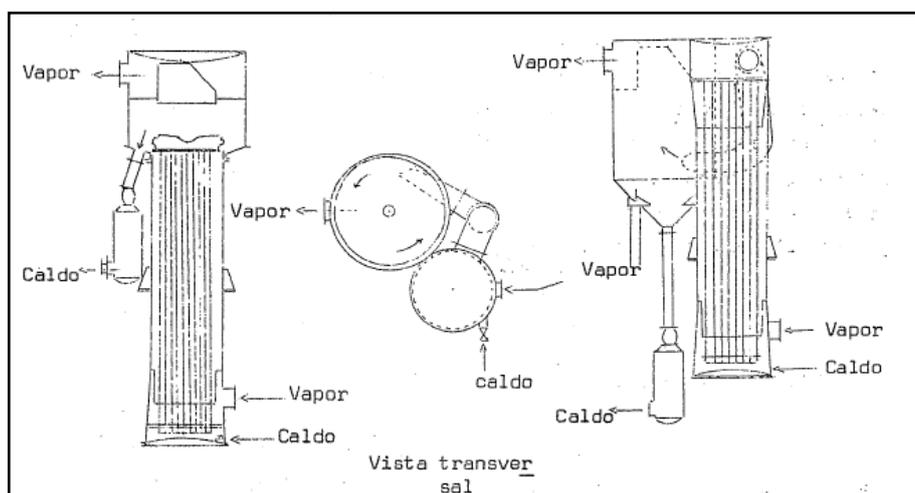


Fig. 10 – Evaporador de corpo único e Evaporador com câmara externa.

- **Funcionamento dos evaporadores Kestner**

Segundo HUGOT, os evaporadores Kestner mostram-se eficientes

apenas no caso em que o caldo chega a sua calandra tubular numa temperatura bem próxima de sua temperatura de ebulição. Isto porque, se o caldo chega à calandra numa temperatura bem inferior a sua temperatura de ebulição, será necessário aquece-lo até que atinja este índice de fervura. Como no Kestner o caldo sobe pelos tubos apenas uma vez, verifica-se que na zona inferior da calandra tubular se tem uma menor taxa de transmissão de calor, visto que esta zona trabalha submersa no caldo que está numa menor temperatura. Admite-se, pois, que esta zona tubular trabalha como aquecedor de caldo e, em decorrência, a ascensão de caldo neste setor praticamente fica comprometida.

Segundo HUGOT (1969), esta é a desvantagem do Kestner sobre os aparelhos comuns, os quais permitem aquecer o caldo e evaporá-lo (caso mais comum da prática açucareira).

Diante desse possível inconveniente, recomenda-se instalar o Kestner, prevendo-se um pré-aquecimento do caldo para próximo de sua temperatura de ebulição. Aliás, esta medida é também recomendável aos evaporadores clássicos.

Originalmente, os vasos Kestner foram empregados como pré-evaporadores. O caldo, sendo mais diluído, sobe com mais facilidade nos tubos e a evaporação é mais efetiva. O caldo, A medida que o caldo vai adquirindo uma maior concentração, torna-se mais viscoso, sendo e difícil será a sua circulação em tubos mais longos. Contudo, existem instalações de múltiplos efeitos com vasos Kestner.

- **Vantagens e Desvantagens**

- **Vantagens**

- a - Ocupa menor espaço no sentido horizontal;
- b - Dada a maior velocidade de circulação do caldo, os riscos de inversão e coloração são mínimos, mesmo em presença de temperatura e pressão elevadas;
- c - Possibilidades de formação de pouca incrustação em razão da maior velocidade de circulação.

- **Desvantagens**

- a - Exigência de prédio muito alto;

b - Exigência de maior espaço, em se tratando de instalação com câmara de vapor lateral.

3.2.4.3 Evaporadores Compactos

Os evaporadores, conhecidos como compactos nada mais são do que uma versão intermediária entre as modelos clássicos como os Kestner.

De modo geral, nos evaporadores compactos a calandra tubular do primeiro vaso tem os seus tubos num comprimento bem maior do que os tubos das demais calandras. Nesta calandra, se lança mão do princípio de película ascendente, base dos evaporadores Kestner, apesar de que os tubos empregados em alguns evaporadores recém construídos não têm passado de 4 m de comprimento. A circulação do caldo é feita por uma só passagem e a sua saída é feita lateralmente, próxima do espelho superior da calandra.

A alimentação do vapor do primeiro vaso, ao contrário do evaporador “Segura” é feita pela parte inferior e central da primeira calandra, nos outros vasos, a circulação do vapor é axial, conforme mostra o esquema da Figura 12.

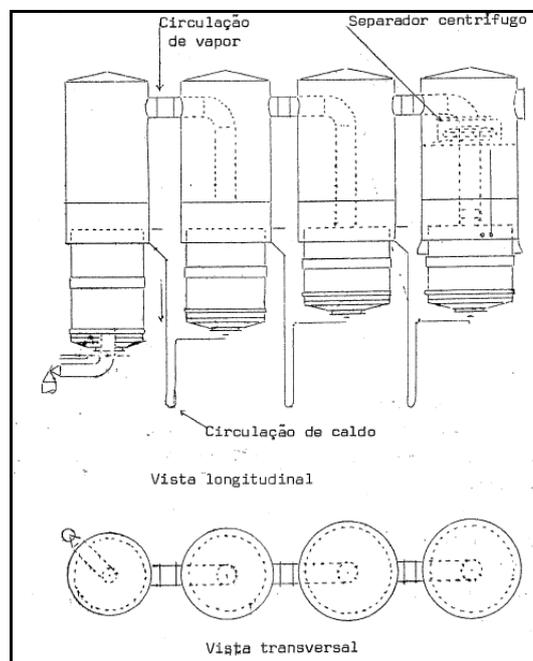


Fig. 12 - Evaporador Compacto

Visando dar maior resistência aos vasos e facilitar a retirada das águas condensadas em dois pontos, as calandras desses evaporadores estão providas de um espelho intermediário.

Como este evaporador compacto se caracteriza por proporcionar uma maior taxa de transmissão de calor, dada principalmente pelo primeiro vaso, uma sangria de vapor pode ser prevista nesta primeira unidade.

Dado ao princípio de que o caldo adquire sempre maior velocidade quando em circulação em tubos mais finos e longos (vasos Kestner), para evitar que o jato do líquido e vapores que se projeta do orifício superior dos tubos, alcance à seção de saída, há necessidade de se utilizar de bons separadores de arrastes.

Dentre os diversos tipos existentes, deve ser instalado de preferência o separador centrífugo deve ser instalado de preferência. Aliás, o maior problema ocasionado nesses aparelhos tipos compactos, tem sido a grande taxa de arraste de sacarose junto com o vapor. Provavelmente, a colocação de chapas defletoras na câmara de evaporação, fazendo com que o vapor percorra o caminho em zig zag, aliado a ação de um separador centrífugo, deve diminuir esta taxa de arraste.

Por outro lado, nesses evaporadores, a saída de caldo pela parte superior da calandra constitui outro fator favorável ao arraste. Entretanto, essas sugestões, devem ser encaradas com reserva para que não haja muito empecilho no caminhamento do vapor. Deve-se evitar que o evaporador trabalhe “preso”, o que pode redundar em danos materiais e na eficiência da operação.

No dimensionamento dos evaporadores é muito importante a relação: altura da calandra e altura da câmara de evaporação, assim como área transversal do vaso. A circulação de caldo, nesses evaporadores pode ser através de sifão ou de outro tipo qualquer.

Conforme se tem observado, os evaporadores compactos apresentam os diversos vasos com o mesmo diâmetro de calandra, os quais diferenciam-se apenas quanto à altura do feixe tubular (Figura 12).

3.2.4.4 Evaporador WEBRE

O novo evaporador **WEBRE** nada mais é do que um equipamento clássico de evaporação. Entretanto, no estudo desse evaporador este grande estudioso da tecnologia açucareira, prevê há modificações a merecedoras de serem discutidas.

Segundo **WEBRE**, a eficiência dos evaporadores está na velocidade com que o calor passa através da superfície tubular da calandra. As modificações de

WEBRE prevê melhorias nos pontos que podem interferir na transmissão deste calor de vapor e em outras particularidades do equipamento, conforme se poderá ver a seguir.

- **Alimentação de vapor**

Neste novo evaporador, a entrada de vapor é feita em um só ponto, alojando-se este elemento em um distribuidor vertical, situado interiormente na forma de cunha, alcançando desde o espelho superior até o inferior e estendendo-se quase até o tubo central descendente (Figura 13).

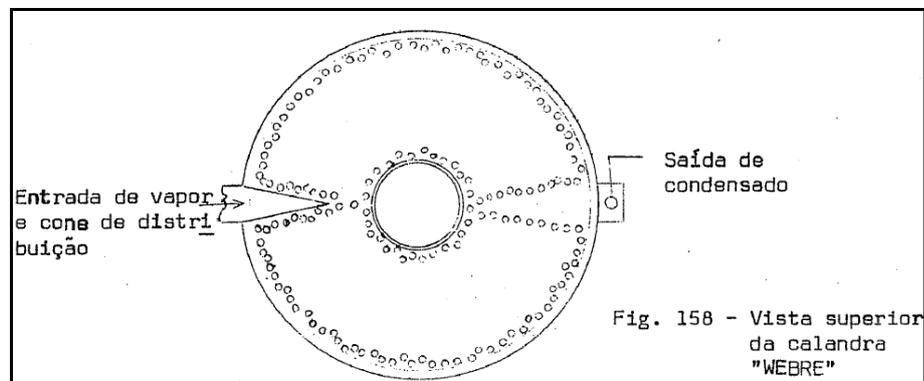


Figura 13 – Demonstração da entrada de vapor

A largura inicial do distribuidor tem a mesma dimensão do diâmetro do tubo de alimentação do vapor. Os dois lados da parede do cone de distribuição de vapor estão providos de um grande número de furos, relativamente pequenos, cuja área total é ligeiramente maior do que a do tubo de alimentação do vapor.

Nessas condições o vapor entrante fica bem subdividido, fluindo para toda a seção tubular em lugar de passar de maneira casual ou furtiva entre os tubos.

- **Extração dos gases incondensáveis**

A extração dos gases incondensáveis é feita por pequenas conexões tubulares, com distribuição assimétrica e instaladas exteriormente à calandra, pouco acima do seu espelho inferior. Essas conexões são ligadas a um outro tubo de drenagem principal. A tubulação de drenagem principal é provida de registro de controle.

- **Drenagem dos condensados**

A drenagem de condensado é feita do lado oposto à entrada de vapor num pequeno compartimento tubular, colocado a partir da placa inferior da calandra, conforme mostra a Figura 14 .

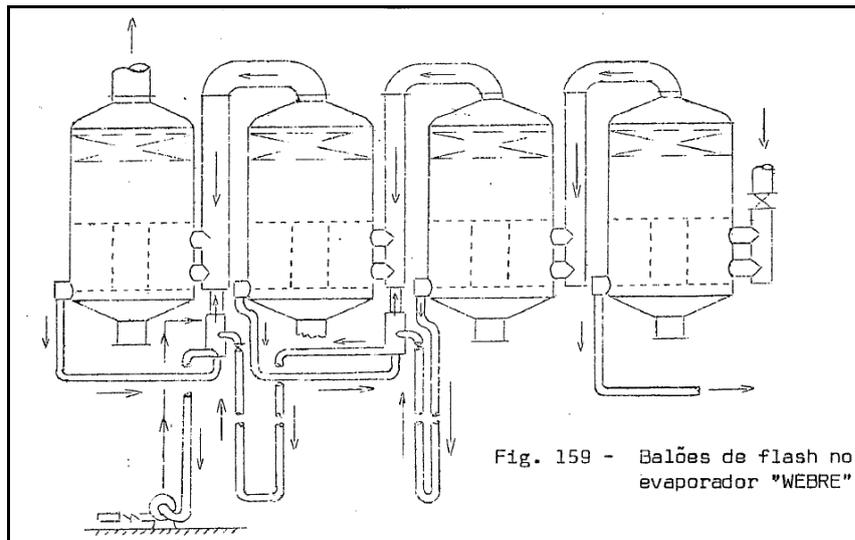


Fig. 14 – Demonstração da drenagem do condensado

Neste setor é feita uma abertura semi-circular da parte mais baixa da calandra. Outra particularidade importante é a omissão de alguns tubos neste setor da calandra, (Figura 13), providência esta que proporciona um espaço vazio para a saída das águas condensadas. Neste caso, a drenagem se realiza livremente sem retornar à placa inferior dos tubos.

WEBRE prevê neste seu evaporador o aproveitamento do "flash" provocado pela recirculação das águas condensadas. (Figura 14). No sistema descrito, a água condensada do segundo vaso é transferida através de um sifão invertido dentro de um balão de flash, instalado precisamente sob os evaporadores entre o segundo e o terceiro vasos ou efeitos.

Este balão de flash está ligado pela sua parte superior a parte inferior do tubo de alimentação de vapor que chega a terceira calandra. Devido a diferença de pressão, aí tem lugar uma auto-evaporação e o flash produzido (vapor produzido a mais) se soma ao vapor resultante da segunda calandra que chega a mesma

unidade do terceiro corpo, conforme esquema da Figura 14. A água condensada do terceiro corpo vem ao fundo deste primeiro balão de flash por gravidade. A mistura das águas condensadas do segundo e terceiro corpo vão agora para um segundo balão de flash, situado entre o terceiro e o quarto vasos, através de um sifão invertido, como no caso anterior. Do mesmo modo, o vapor resultante do flash deste segundo balão vai ao fundo da tubulação de vapor que chega ao quarto vaso, levando as evaporações do terceiro vaso. As águas condensadas da quarta calandra entram pelo fundo deste segundo balão de flash. Aqui se misturam com as águas provenientes do segundo e terceiro vasos sendo retiradas por uma bomba centrífuga instalada sobre o piso deste setor da usina. Uma ligação, destinada a igualar a pressão ou vazio e uma válvula de retenção do lado da descarga de água devem ser previstos na instalação.

Segundo **WEBRE**, com o fim de obter uma separação entre a água e os vapores em balões de flash, construídos de forma cilíndrica, as entradas e saídas devem ser feitas tangencialmente, uma à direita e outra à esquerda, com a água quente saindo próximo do fundo do balão e a água entrante (a que vem das calandras precedentes), penetrando no meio do balão ou acima.

Na parte superior de cada sifão invertido no lodo de descarga, há uma válvula a qual tem que ser regulada para evitar turbulência nas tubulações.

- **Circulação de caldo**

No evaporador **WEBRE** a circulação do caldo é do tipo “Chapman” (Figura 15). **WEBRE** chama este tipo de Alimentação de “Tubo Central Descendente Fechado”.

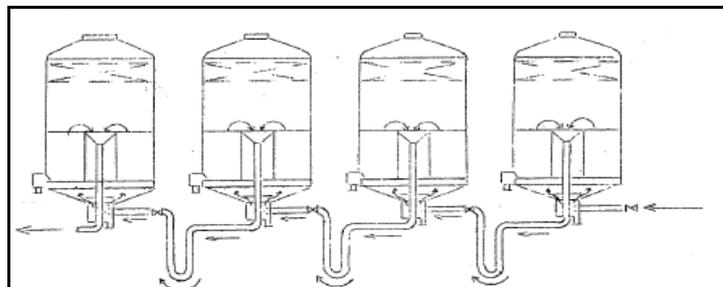


Figura 15 – Circulação de caldo no evaporador WEBRE

Admite Segundo o autor que, por este sistema o caldo entrante circula ascendentemente através dos tubos da calandra, devendo cair no tubo central que o

conduzirá ao fundo do vaso seguinte ou à bomba de xarope, no caso do quarto vaso. A circulação é complementada pelo uso de sifões invertidos, controlados por válvulas no lado de saída, instalação esta que evita qualquer turbulência decorrente da presença de vapores nas canalizações. A vantagem deste sistema sobre os evaporadores convencionais é estimada entre 25 a 50%, dependendo das condições locais. Este sistema, segundo WEBRE, permite realmente um maior aproveitamento do flash produzido pela entrada do caldo nas calandras que é, neste caso, muito melhor distribuído; neste sistema não há conflito entre o caldo entrante e o caldo de saída, a distribuição do caldo é melhor orientada, além do que, não se verifica a intensa recirculação de caldo, muito comum nos desenhos convencionais.

- **Separador de arraste**

Neste desenho de evaporador, **WEBRE** prevê a colocação de um separador de arraste na câmara de evaporação pouco acima do seu meio. Este separador é do tipo centrífugo e calculado adequadamente. O caldo arrastado pelos vapores é drenado para uma parte mais baixa do aparelho através de conexão externa.

Os outros acessórios deste evaporador são os já tradicionalmente conhecidos da tecnologia açucareira.

3.2.4.5 Evaporadores Falling Film 1ª e 2ª geração

A indústria brasileira de produção de açúcar e álcool possui baixos custos de produção, sendo mais eficiente que em muitos países desenvolvidos, porém, possui condições de explorar ainda mais esta vantagem e conseqüentemente incrementar a lucratividade. O caminho é a melhoria da eficiência energética da usina onde ainda há vários pontos que podem reduzir ou até mesmo eliminar as perdas.

Neste contexto, a evaporação é o coração do processo, tendo em vista que todo o vapor produzido após gerar energia mecânica/elétrica, para acionar a usina, é encaminhado para a evaporação, o que conhecemos por “**vapor de escape**”. Esse vapor é condensado no Pré-evaporador ou “1º efeito” e regenera-se,

formando o vapor vegetal responsável por fornecer energia aos demais processos, como cozimento, destilação, entre outros.

Nas caixas de evaporação é comum o uso de evaporadores tipo *Robert*, sendo o mais difundido no Brasil. Por operarem com grandes diferenciais de temperatura entre o vapor e o caldo, torna-se muito limitado o uso de sangrias a partir do 3º efeito necessitando assim de maior quantidade de vapor para a operação.

Os evaporadores tipo *Robert*, conforme figura 16, trabalham com calandra inundada permitindo operação manual, suportando as variações de fluxo de caldo, operando com circulação natural e permitindo tanto limpeza química (CIP) quanto mecânica manual.

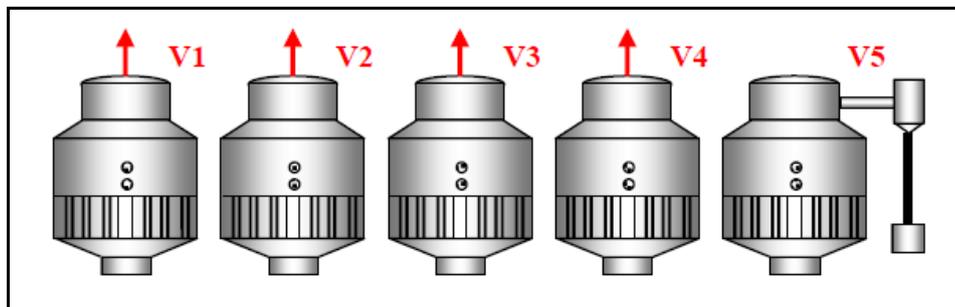


Figura 16: Esquema típico de Evaporadores tipo Robert. Fonte: GEA do Brasil

Os evaporadores tipo película descendente (conhecidos como *Falling Film*) criam condições mais propícias para alcançar melhor rendimento quando comparados aos equipamentos convencionais. Os evaporadores *Falling Film* são evaporadores de tubos longos para fluxo descendente, sendo alimentado com vapor de escape a 127°C e caldo a 115°C, apresentando soluções de eficiência energética mais aprimorada que os evaporadores tipo *Robert* (GEA DO BRASIL, 2007).

Enquanto nos evaporadores tipo *Robert*, o tempo de residência do caldo é cerca de 15 minutos, no evaporador *Falling Film* é de 3 a 5 minutos. Entretanto, os evaporadores *Falling Film* requerem automação e são mais sensíveis as variações de carga, operando com circulação forçada através de bombas e permitindo somente limpeza química (CIP) devido às limpezas mecânicas serem demoradas, dispendiosas e serem realizadas somente na entressafra, quando necessário.

Os evaporadores *Falling Film* são construídos de forma a facilitar a troca de calor entre o vapor e o caldo, percorrendo uma trajetória menor o que por consequência acarreta na diminuição de temperatura para que o vapor realize a operação com maior eficiência.

Em função das características construtivas, o evaporador *Robert* exige um diferencial alto de temperatura (12°C) entre o vapor e o caldo para realizar a troca de calor. Esta diferença de 12°C é necessária para que o caldo no centro receba o calor do vapor para então evaporar.

Segundo estudo realizado pela empresa GEA do Brasil (2007), no gráfico 1 pode-se verificar a comparação dos ganhos obtidos nos evaporadores *Falling Film*, apresentados como temperaturas dos vapores vegetais obtidos nos evaporadores tipo *Robert* e os *PFFE* (*Plate Falling Film Evaporator*).

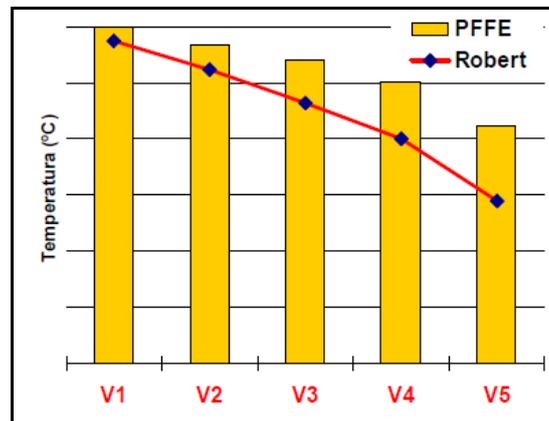


Figura 17. Comparação tipo Robert e os PFFE (*Plate Falling Film Evaporator*).

No gráfico acima é possível verificar que as temperaturas do *Falling Film* são superiores em todas as etapas, e como há efeito acumulativo na última fase, a diferença pode chegar a 27°C . Observa-se também que o V3 do *PFFE* tem valor superior ao V2 do *Robert*, significando que é possível utilizar mais uma vez o vapor nas caixas antes de fazer a sangria para outro local da usina (GEA DO BRASIL, 2007).

Segundo mesma fonte, para demonstrar melhor o ganho de energia, pode-se analisar a seguinte situação na usina, conforme a tabela 1, sendo os resultados apresentados na tabela 2.

Tabela 1: Situação na usina

Entrada de Caldo	300 T/h a 18°Brix
Vapor de Escape	127°C
Sangrias	80 T/h a 115°C e 40 T/h a 108°C

Tabela 2: Comparação dos ganhos obtidos dos vapores vegetais com evaporadores tipo robert e pffe

Parâmetro	Evaporador robert	Evaporador pffe
Vapor de escape	129,3 T/h	101,8 T/h
1ª Sangria	80 a 115°C	20 a 119°C
2ª Sangria	40 a 108°C	60 a 106°C
3ª Sangria	-----	20 a 101°C
Condensador	16,7 T/h	8,0 T/h

Pode-se constatar que para uma sangria total de 120 t/h que foi redistribuída nos 03 primeiros efeitos conseguiu-se duas principais reduções: consumo de vapor de escape e no vapor para o condensador barométrico (GEA DO BRASIL, 2007).

Conforme a empresa GEA do Brasil (2007), o consumo de vapor de escape foi reduzido 21% e atingiu um excedente de 27,5 T/h, podendo gerar cerca de 9,3 MW na turbina de condensação. O vapor para o condensador barométrico obteve redução de 52% no fluxo a ser condensado e conseqüentemente, a vazão de água para condensação também foi reduzida.

Visando maior eficiência do processo, existem basicamente dois tipos de evaporadores *Falling Film* disponíveis no mercado, o evaporador *Falling Film* de 1ª e 2ª Geração.

- **Evaporador Falling Film 1ª Geração**

O evaporador *Falling Film* de 1ª geração é do tipo tubular, dotado de tubos verticais, com entrada de vapor na lateral superior, indicada pela seta

vermelha, conforme figura 17. O caldo é alimentado na base e bombeado até o distribuidor na parte superior, onde é distribuído adequadamente e de maneira uniforme no interior dos tubos, formando o filme de caldo para então “escorrer” dentro dos tubos e aumentar sua concentração através da evaporação da água contida no caldo. O vapor vegetal e o caldo com maior concentração de Brix são separados e coletados na base do evaporador.

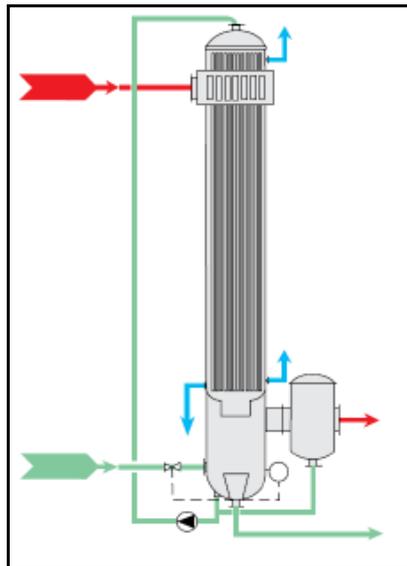


Figura 17: Evaporador Falling Film 1ª geração.
Fonte: GEA do Brasil

O sistema de separação de vapor vegetal e de caldo é um ponto muito importante do evaporador, pois um grande arraste de caldo no vapor vegetal representa dois inconvenientes: o primeiro é a perda de caldo no condensado do efeito seguinte e o segundo é a redução da eficiência de troca térmica na próxima caixa de evaporação.

Conforme a empresa GEA do Brasil (2007), para minimizar estes efeitos existe 04 opções de separadores do caldo e do vapor vegetal: o do tipo lamelar (conforme ilustrado na figura 17), centrífugo, superior com dutos de vapor externo e por gravidade, conforme figura 18, respectivamente.

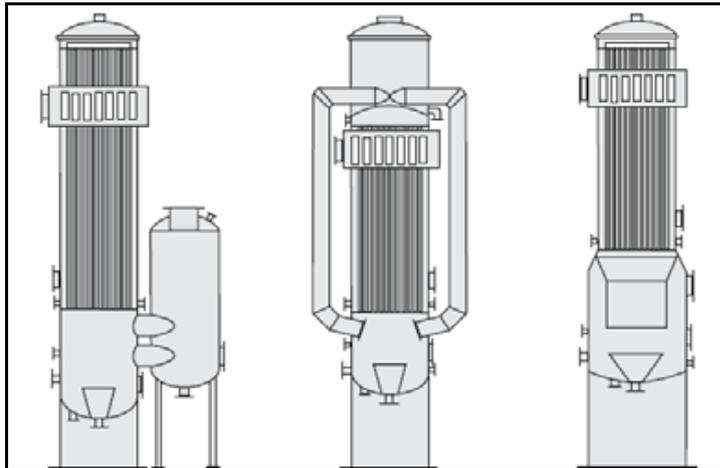


Figura 18. Tipos de separadores de vapor vegetal e caldo. Fonte: GEA do Brasil

Entretanto, o evaporador *Falling Film* de 1ª geração possui alguns pontos críticos que devem ser levados em consideração, como por exemplo, a limpeza e a bomba de circulação (GEA DO BRASIL, 2007).

Segundo mesma fonte, a limpeza para esses evaporadores ainda necessita de hidrojateamento com alta pressão. Com relação à bomba de circulação, existe consumo de energia elétrica para a circulação do caldo entre a bacia do evaporador e o distribuidor, porém se calcularmos a economia global e não somente ao que se refere ao evaporador, vamos comprovar que o ganho na turbina é muito superior ao consumo da bomba isolado.

- **Evaporador *Falling Film* 2ª Geração**

Na 2ª geração de evaporadores *Falling Film* do tipo a placas é possível atingir os ganhos apresentados anteriormente, devido a sua tecnologia oferecida tanto em sua configuração quanto na forma construtiva.

Operando com taxas de evaporação com cerca de 50% a 100% mais elevadas que o modelo *Robert*, com aparelhos limpos, estando livre de incrustações devido à alta velocidade em seu interior, permite uma grande superfície de troca térmica e um diferencial de temperatura entre o vapor e o caldo ainda menor que os tubulares da 1ª geração (GEA DO BRASIL, 2007).

De acordo com a empresa GEA do Brasil (2007), utilizando os trocadores de calor a placas é possível aproveitar ao máximo a energia térmica

disponível no sistema, sem novos custos, transferindo-a para outra parte do processo onde será mais bem aproveitada.

Segundo mesma fonte existe diversos tipos de trocadores de calor a placas, entretanto, na aparência eles são semelhantes, mas em seu interior é que estão as diferenças. Para cada necessidade se aplica um conjunto de placas e vedações. O trocador de calor a placas convencional consiste numa série de placas corrugadas, gaxetadas ou soldadas entre si, dependendo dos fluídos e da necessidade de abertura do equipamento. As placas são depois comprimidas por uma estrutura rígida para criar um arranjo de canais de fluxos paralelos.

- **Princípio de funcionamento do evaporador de 2ª geração**

O caldo é distribuído adequadamente na parte superior do pacote de placas pelo distribuidor (seta verde) e o vapor de aquecimento cruza as placas no sentido horizontal (seta vermelha), conforme figura 19, em função da corrugação especial das placas, podendo utilizar espessuras menores que os tubos e assim obter um diferencial de temperatura entre o vapor e o caldo ainda menor, ampliando desta forma o ganho neste evaporador (GEA DO BRASIL, 2007).

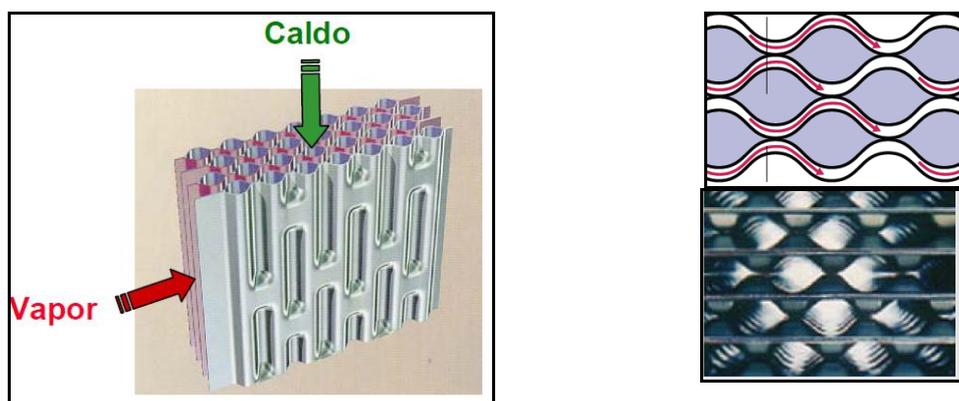


Figura 19: Princípio de Funcionamento Falling Film. Fonte: GEA do Brasil

A construção do evaporador a placas é simples e semelhante ao de 1ª geração, porém, a maior diferença encontra-se na distribuição do caldo sobre as placas e não sobre os tubos, e em alguns modelos, a saída do vapor vegetal situa-se na parte superior sendo possível minimizar o arraste com a instalação de lamelas junto ao bocal, conforme figura 20.

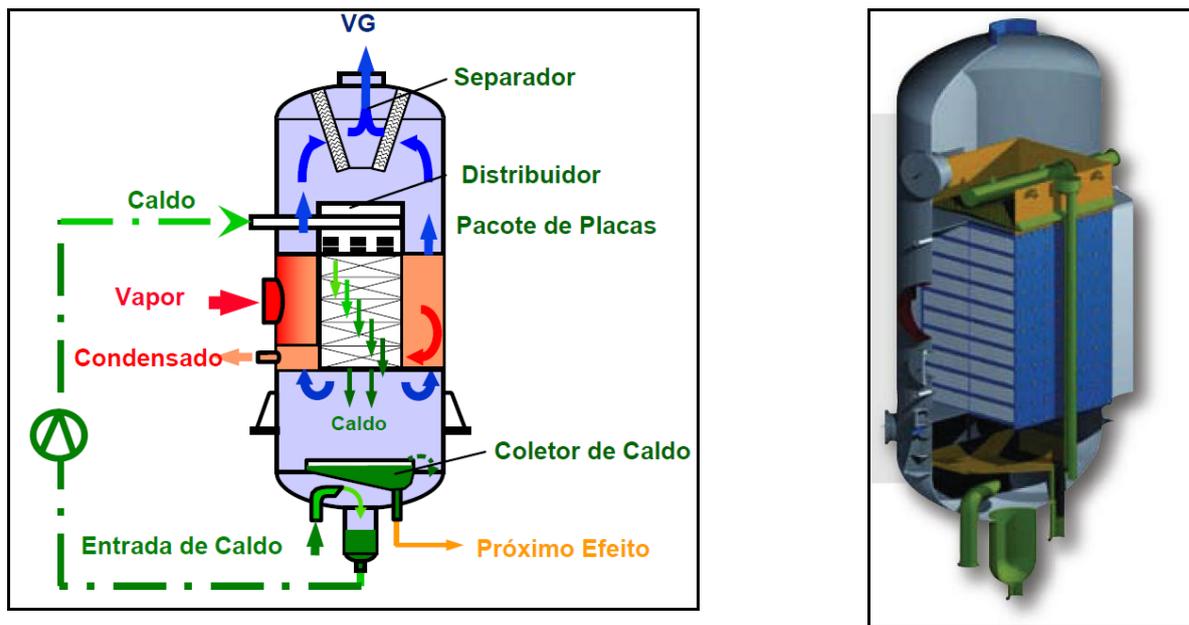


Figura 20: Evaporador a placas Falling Film 2ª geração. Fonte: GEA do Brasil

Esses evaporadores, conforme observado utilizam placas ao invés de tubos para realizar a troca térmica podendo operar de forma similar ao *Robert*, com caldo recalçado em alta velocidade (GEA DO BRASIL, 2007).

Os evaporadores Falling Film de 2ª geração trabalham com alta eficiência por utilizar máxima área de transferência de calor, maior turbulência, possuir distribuição uniforme, utilizar maiores pressões e haver mínima formação de incrustações. A limpeza deve ser obrigatoriamente química (CIP), não permitindo limpeza mecânica (GEA DO BRASIL, 2007).

- **Conversão do evaporador tipo Robert em *Falling Film* 2ª Geração**

No Brasil, a grande maioria dos evaporadores nas usinas de açúcar é do tipo *Robert*, sendo que muitos destes ainda encontram os cascos em bom estado de conservação, sendo necessário, portanto, apenas a troca dos tubos. Para tal ocasião há a opção de conversão do evaporador *Robert* para o evaporador *Falling Film* de 2ª geração a placas, através de um *Retrofit*, onde além das vantagens já demonstradas, há aumento da área de evaporação em até 3 vezes, podendo ter um acréscimo de 200% na vazão de caldo, segundo a empresa GEA do Brasil (2008).

No início, essa conversão de evaporadores passou por algumas dificuldades até obter a perfeita adequação de operação com o caldo de cana e a limpeza do evaporador. Entretanto, na safra de 2008 essas etapas já estavam

concluídas e houve a primeira estação completa de evaporadores a placas *Falling Film* no Brasil utilizando todos os múltiplos efeitos – do 1º ao 5º (GEA DO BRASIL, 2008).

Essa conversão de evaporadores acarretou em grandes ganhos tanto de energia como na qualidade do produto final. Segundo estudos desenvolvidos pela empresa GEA do Brasil (2008), as vantagens de realizar a conversão dos evaporadores proporcionaram menor formação de cor no açúcar devido ao menor tempo de resistência do caldo no equipamento e também menor perda de açúcar por inversão de sacarose.

Segundo mesma fonte, no Brasil há somente 4 evaporadores a placas operando no primeiro efeito e um *retrofit* (conversão de *Robert* para placas) no 5º efeito.

- **Etapas para conversão do evaporador *Robert* para *Falling Film* de 2ª geração.**

Conforme dados da empresa GEA do Brasil (2008), todas as modificações desenvolvidas são facilmente realizáveis na própria usina e representam cerca da metade do investimento de um evaporador completo a placas, permitindo desta forma que o usuário tenha todos os benefícios da 2ª geração de evaporadores a baixo custo.

As etapas desta modificação estão representadas na figura 21.

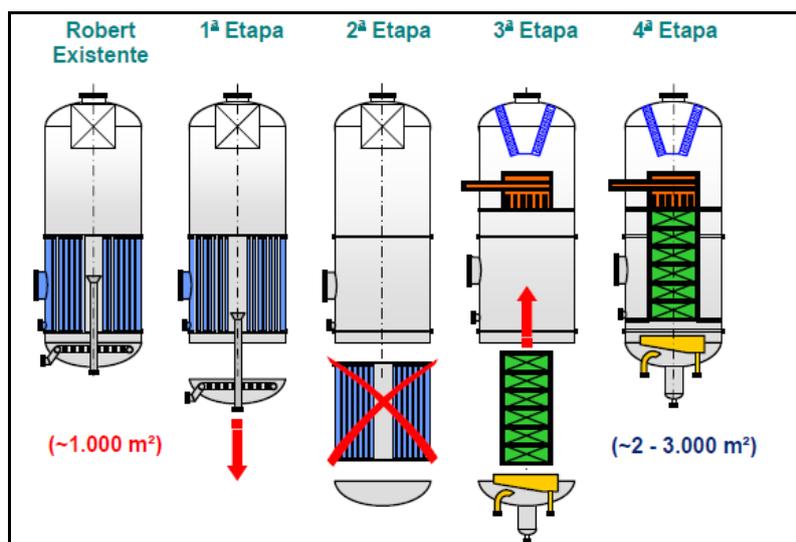


Figura 21: Etapas para conversão de um evaporador tipo Robert em Falling Film 2ª geração. Fonte: GEA do Brasil

Primeiramente, retira-se o tampo inferior do evaporador Robert e em seguida, os feixes de tubos e espelhos. Então se instala as lamelas na saída do vapor vegetal, no distribuidor de caldo e há o posicionamento do pacote de placas e bandeja coletora de caldo no interior do corpo cilíndrico, conforme ilustrado na figura 6 acima. Na última etapa, ocorre a soldagem das placas “meia-lua” para que então a câmara de vapor de escape se feche. Para finalizar a conversão, há o fechamento do tampo inferior com os bocais de entrada e saída de caldo (GEA DO BRASIL, 2008).

Para que essa conversão seja perfeita, deve-se ficar atento principalmente na instalação do distribuidor de caldo, pois este equipamento permite que toda superfície seja coberta com caldo evitando assim, sua queima (GEA DO BRASIL, 2008).

- **Aumento de capacidade de um evaporador tipo *Robert***

Atualmente nas usinas de açúcar do Brasil ainda existem vários evaporadores tipo *Robert* em uso para realizar a evaporação e concentração de caldo devido sua fácil utilização, baixo custo de investimento e manutenção simples.

Segundo Salla (2008), como os evaporadores tipo *Robert* possuem limitações com relação o aumento de sua capacidade, há a possibilidade de ser instalado um trocador de calor a placas na entrada do caldo, utilizando vapor de escape (VE), conforme figura 22.

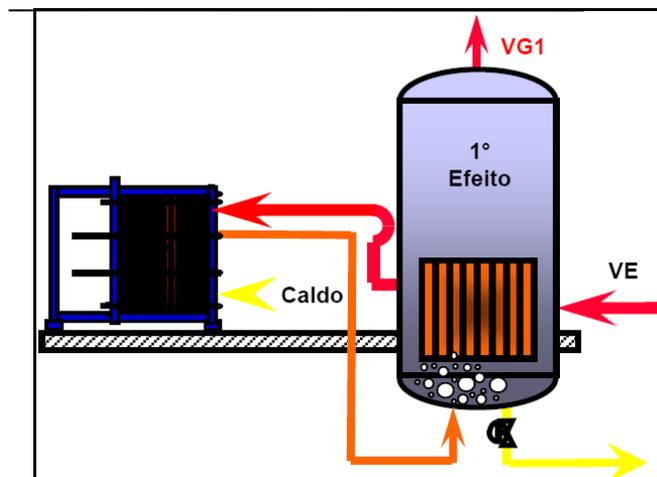


Figura 22: Esquema representativo para aumento de capacidade.

Fonte: GEA do Brasil

Segundo Salla (2010), no croqui representado acima, o caldo é aquecido com vapor de escape dentro de um trocador a placas obtendo desta maneira uma temperatura do caldo na saída superior à de evaporação (*Boiling Point*) e produz por consequência o efeito *Flash* no interior do evaporador *Robert*. A grande formação de bolhas de vapor vegetal aumenta a turbulência dentro dos tubos do evaporador, melhorando também o coeficiente global de transmissão de calor (OHTC). Observa-se também que, por acelerar o processo de evaporação, o tempo de residência e a inversão da sacarose são reduzidos.

Em função do uso de caldo clarificado, a corrugação das placas recomendada é a convencional do tipo espinha de peixe, conforme figura 23. Com esta configuração a capacidade de evaporação do *Robert* pode aumentar em até 20% de forma econômica e de fácil instalação nos equipamentos existentes, de acordo com Salla (2008).

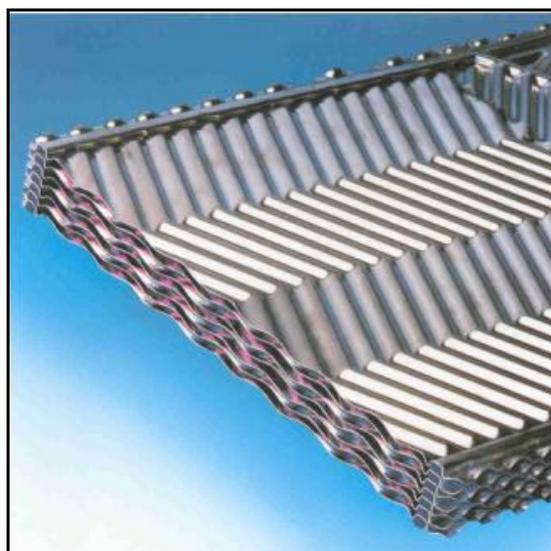


Figura 23: Ilustração da corrugação da placa tipo espinha de peixe. Fonte: GEA Brasil

Segundo Salla (2008), para as situações em que o objetivo é aumentar a capacidade do conjunto de evaporadores e não somente no primeiro efeito, a empresa GEA do Brasil desenvolveu um perfil de placa especial com corrugação *FREE-Flow* e grandes bocais de entrada de vapor de aquecimento e de saída do vegetal, onde o processo de evaporação ocorre sobre a superfície da placa e o caldo é separado do vegetal na parte superior do *Robert*, conforme figura 24.

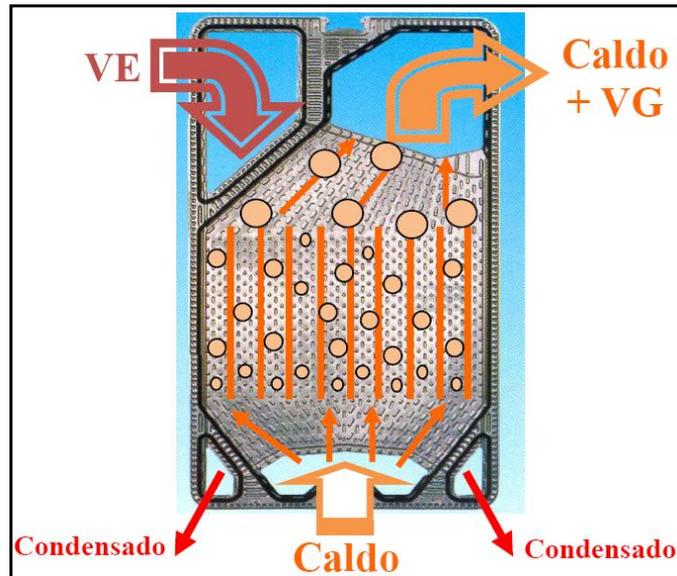


Figura 24: Ilustração da corrugação FREE-Flow . Fonte: GEA do Brasil

- **Características das placas de corrugação *FREE-Flow***

Largura dos canais: O canal ao lado do caldo tem 7,5 mm e o do vapor 4,5 mm, isto se torna interessante já que o vapor vegetal tem volume específico maior que o de escape e desta forma obtém grandes intervalos entre as limpezas, pois o coeficiente global de transmissão de calor é mantido por um longo período de tempo.

Perfil *FREE-Flow*: A corrugação diferenciada da placa permite que as incrustações sejam retiradas mais facilmente por *CIP* (limpeza sem abertura do trocador), além de manter a seção do canal constante sem estrangulamentos como normalmente encontra-se disponível no mercado. Este perfil de placa possui baixa perda de carga e, em muitos casos dispensa o uso de bomba de circulação de caldo.

Placas Soldadas: As placas são soldadas a laser duas a duas, formando o chamado cassete, ficando a vedação entre um par de placas soldadas através de gaxetas convencionais. Esta construção permite a eventual limpeza mecânica das placas no final da safra.

O fluxograma de interligação do evaporador *CT 193* com o *Robert* operando no primeiro efeito é demonstrado na figura 25.

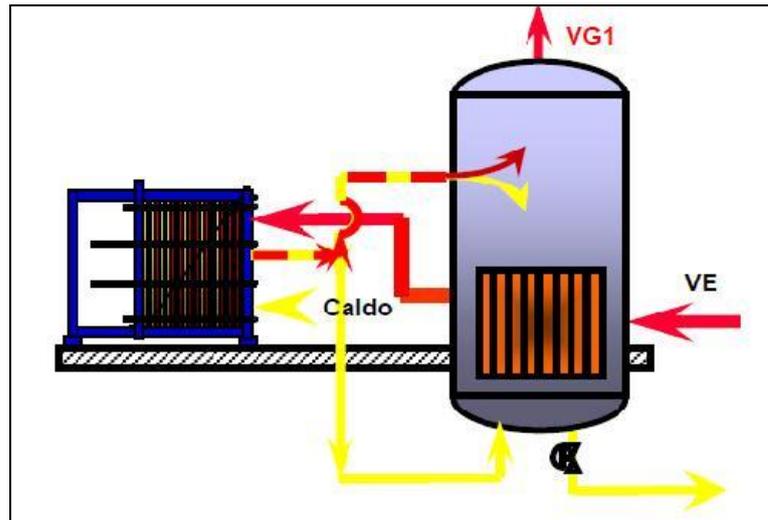


Figura 25: Fluxograma de interligação operando no primeiro efeito.

Fonte: GEA do Brasil

Entretanto, devem ser levados em consideração alguns pontos que a empresa GEA do Brasil (2008) ressalta serem relevantes que estão demonstrados na tabela 3.

Tabela 3: Pontos relevantes para a interligação do evaporador *ct 193* com o *robert*

Vapor de Aquecimento	O vapor de escape (VE) que alimenta o evaporador a placas passa antes pela câmara de vapor do <i>Robert</i> para então entrar no trocador. Esta etapa é muito importante para garantir que o vapor esteja saturado, já que normalmente na saída da turbina temos um ligeiro superaquecimento e algumas vezes o desuperaquecedor pode apresentar problemas de funcionamento sem que o operador perceba. Desta forma, evita-se que o caldo seja queimado no interior das placas e também se prolonga a vida útil das gaxetas, pois não as mesmas não são expostas ao calor excessivo.
Separador	A saída de caldo mais o vapor vegetal do trocador a placas são encaminhados ao <i>Robert</i> para que o espaço acima do espelho seja utilizado para separar o vapor do caldo evaporado, para então ser encaminhado ao próximo efeito pela saída inferior do corpo existente.

Segundo Salla (2010), para as estações de evaporação *Robert* com múltiplos efeitos que já estejam no limite de capacidade pode-se instalar o evaporador *CT-193* entre cada um dos efeitos conforme figura 26.

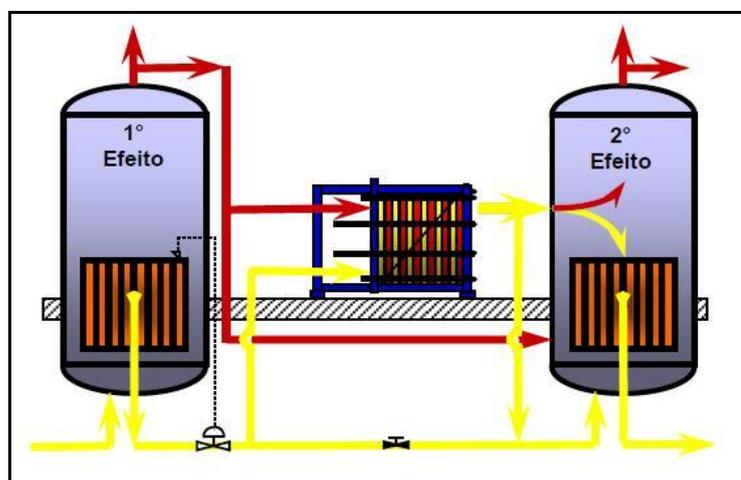


Figura 26: Instalação do evaporador CT-193 ao múltiplo efeito Robert.

Fonte: GEA do Brasil.

Segundo Salla (2010), o princípio de funcionamento é o mesmo para um único efeito, ou seja, o processo de evaporação inicia-se sobre a superfície da placa do trocador e na tubulação de interligação com o *Robert*.

Na tubulação de interligação encontra-se o caldo evaporado com maior teor de Brix que o da entrada, e vapor vegetal. Estes dois fluxos são separados dentro do *Robert* na parte superior dos tubos. Esta configuração permite operar com o *Robert* com plena capacidade além de aumentar a vazão de caldo na estação de evaporação.

Em função da necessidade de distribuir o caldo de forma uniforme sobre a placa, existem dois bocais de caldo estrategicamente posicionados na parte inferior central do trocador e dentro do mesmo critério, a entrada de vapor encontra-se na parte superior esquerda com duas saídas de condensado, conforme figura 27, permitindo que toda a superfície disponível seja efetivamente utilizada.



Figura 27: Trocador de calor com bocais superiores e inferiores para melhor distribuição do caldo. Fonte: GEA do Brasil.

3.2.4.6 Evaporador Névoa Turbulenta Descendente - NTD

Empresas como a L&M Engenharia, estão utilizando o princípio da evaporação de sucos de laranja, limão, sucos tropicais, maçã, uva e extrato de café “**Névoa Turbulenta Descendente**” – **N.T.D**, para pré-evaporação de caldo de cana e também na concentração da vinhaça obtida no processo de destilação do caldo de cana e também na vinhaça obtida no processamento da soja.

Segundo Neto (2010) da empresa L&M Engenharia, os evaporadores projetados operam sob o princípio da “**Névoa Turbulenta Descendente**” – **N.T.D**, que consiste em explodir termicamente o líquido de entrada por meio de um “flash” parcial, resultando em uma mistura de vapor e pequenas partículas líquidas (daí a denominação névoa). Esta névoa é gerada em cada um dos cones de distribuição que alimenta os tubos de cada um dos estágios do evaporador independentemente do número de estágios.

Diferentemente da tecnologia “Película Descendente” ou película fina, a qual depende de dispositivos mecânicos para a distribuição do líquido nos tubos resultando com frequência em distribuição desigual que leva ao aquecimento localizado e como consequência queima do produto nas paredes dos tubos, neste evaporador a névoa é distribuída de forma uniforme devido ao equilíbrio de pressões dentro dos tubos. Desta forma, quando o fluxo em um tubo aumenta, a pressão

dentro do mesmo aumenta e o produto automaticamente é distribuído para outro tubo seguinte (L&M ENGENHARIA, 2010).

Conforme mesma fonte, o produto sob a forma de névoa cai livremente através dos tubos abertos, absorvendo o calor e evaporando a água, aumentando o seu volume. Então ele é acelerado termicamente chegando a velocidades muito altas (em algumas aplicações perto da velocidade sônica) no final dos tubos, como mostra a figura 28.

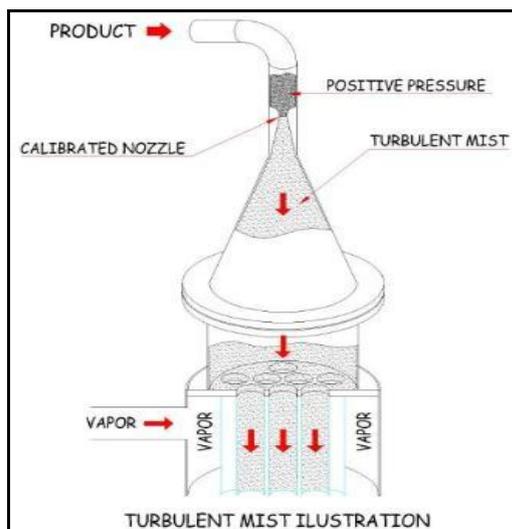


Figura 28: Pré Evaporador de Caldo. Fonte: L&M

Na configuração de um evaporador, a distribuição da superfície de troca de calor, os comprimentos e diâmetros dos tubos, o controle da velocidade do produto sob a forma de névoa, o número de efeitos, o arranjo do pré-aquecedor e uma série de outras considerações variam bastante dependendo das características do produto, consumo de energia desejado, etc. (L&M ENGENHARIA, 2010).

Vantagens:

a) Menor Tempo de Exposição ao Calor

Os evaporadores NTD são de passo único, sem recirculação, com múltiplos efeitos e estágios. Devido à alta velocidade do produto, a transferência de calor para ele é feita rapidamente. Desta forma, o tempo de exposição do produto ao calor é consideravelmente menor e, sendo em meio aberto, elimina-se a possibilidade de aquecimento localizado.

b) Inexistência de Aquecimento Localizado

O princípio de operação dos evaporadores N.T.D propicia a distribuição uniforme do produto dentro dos tubos através da equalização de pressão não sendo necessária à utilização de dispositivos mecânicos. A distribuição uniforme evita o aquecimento localizado e a conseqüente queima do produto.

c) Simplicidade de Operação

As variações de capacidade de evaporação e do grau de concentração são obtidos através de simples regulagem nos fluxos de vapor e do produto.

d) Sistema de Limpeza “CIP” – Clean in Place

O procedimento de limpeza é muito simples, realizando-se no próprio local pelo mesmo operador que deverá somente abrir e fechar algumas válvulas, sem que sejam alteradas as condições de operação, ou seja, não há necessidade de desmontagem de nenhuma peça do evaporador no momento da limpeza. Pela sua simplicidade, esse sistema pode ser facilmente automatizado.

e) Maior Tempo de Operação entre as Limpezas

Devido à alta velocidade do produto, sua distribuição uniforme e a inexistência de calor localizado, a incidência de incrustações no interior dos tubos é drasticamente reduzida. Esse diferencial faz com que o período de operação entre as limpezas seja prolongado substancialmente. Dependendo do produto a ser concentrado, o evaporador pode operar até por vários dias sem a necessidade de ser limpo.

f) Baixos Custos de Manutenção

Em nosso evaporador as únicas peças móveis são as bombas. Portanto, normalmente a manutenção se restringe a eventual substituição de selos mecânicos, rolamentos e acoplamentos de bombas.

g) Baixo Custo de Instrumentação

Por ser um equipamento no qual é necessário controlar somente duas variáveis (fluxo de vapor e fluxo do produto), o investimento com instrumentação é muito pequeno comparado aos existentes no mercado. Normalmente, esses evaporadores são fornecidos com instrumentos para serem operados semi-automáticos, porém, eles podem ser totalmente automatizados onde todas as rotinas passam a ser executadas e controladas por PLCs.

h) Durabilidade

Normalmente todas as superfícies em contato com o produto são construídas em aço inox, assegurando uma vida útil de várias décadas.

i) Facilidade de Transporte e Baixo Custo de Instalação

Estes evaporadores são montados dentro de uma estrutura metálica na fábrica. Essas estruturas metálicas são construídas em módulos auto-portantes, tornando o transporte e a montagem mais baratos. Os módulos são transportados em caminhões e ao chegar ao local de instalação, são retirados diretamente dos caminhões por guindastes e montados na posição vertical em suas bases. Além das bases de concreto, não é necessário a confecção de qualquer outro tipo de construção para abrigá-los pois os mesmos são projetados para trabalhar ao relento. Seu tempo de instalação varia de 1 (uma) a 4 (quatro) semanas, dependendo da sua capacidade de evaporação e do número de efeitos.

j) Possibilidade de operar com várias fontes de energia

Esse evaporador pode operar com várias fontes de energia, se adequando as necessidades do cliente, como vapor de escape, nas diferentes pressões e vapor vegetal. Além de que o condensado vegetal oriundo deste processo pode ser utilizado em outras etapas, como na lavagem da cana, lavagem de equipamentos (trocadores de calor, dornas, etc.), como reposição de água de resfriamento, entre outras utilizações.

Pré Evaporador de Caldos “P.E.C.”

O Pré Evaporador de Caldo, “P.E.C”, opera sob o princípio da “Névoa Turbulenta Descendente” mantendo as vantagens que esse princípio proporciona, utilizando como fonte de calor o vapor de escape de 1,5 kgf/cm² e enviando para o processo o vapor de 0,7 kgf/cm², assim como o evaporador tipo Robert (L&M ENGENHARIA, 2010).

Evaporador para Concentração de Vinhaça - ECoFluid®

A Empresa Exal em parceria com a empresa L&M Engenharia, desenvolveram o Compress (figura 29), onde um sistema para concentração de vinhaça “ECoFluid®” (figura 30) é tocado pelos vapores alcoólicos da destilaria, onde os evaporadores operam em vácuo produzido por um Condensador Evaporativo, Condensador Barométrico, Condensador de Superfície ou Multi-Jato, sob o princípio da “Névoa Turbulenta Descendente” - **N.T.D**, mantendo as mesmas vantagens que esse princípio proporciona (L&M ENGENHARIA, 2010).

Conforme a empresa L&M Engenharia (2010), no processo de evaporação, o **ECoFluid®** concentra a vinhaça em dez vezes ou mais em relação ao seu volume inicial, de acordo com as necessidades da empresa, retirando parte da água contida nela, permitindo uma redução substancial no custo do seu transporte e aplicação no campo ou permitindo a queima em caldeiras especializadas. As águas evaporadas, oriundas desse processo oferecem a possibilidade da utilização da água da evaporação, reduzindo a necessidade de captação de água da natureza. Além de ter grande flexibilidade quanto a utilização

de diversas fontes de calor tais como: vapor de escape de turbina, vapor V1 de usinas de cana, vapor de coluna de destilação (Compress), etc.

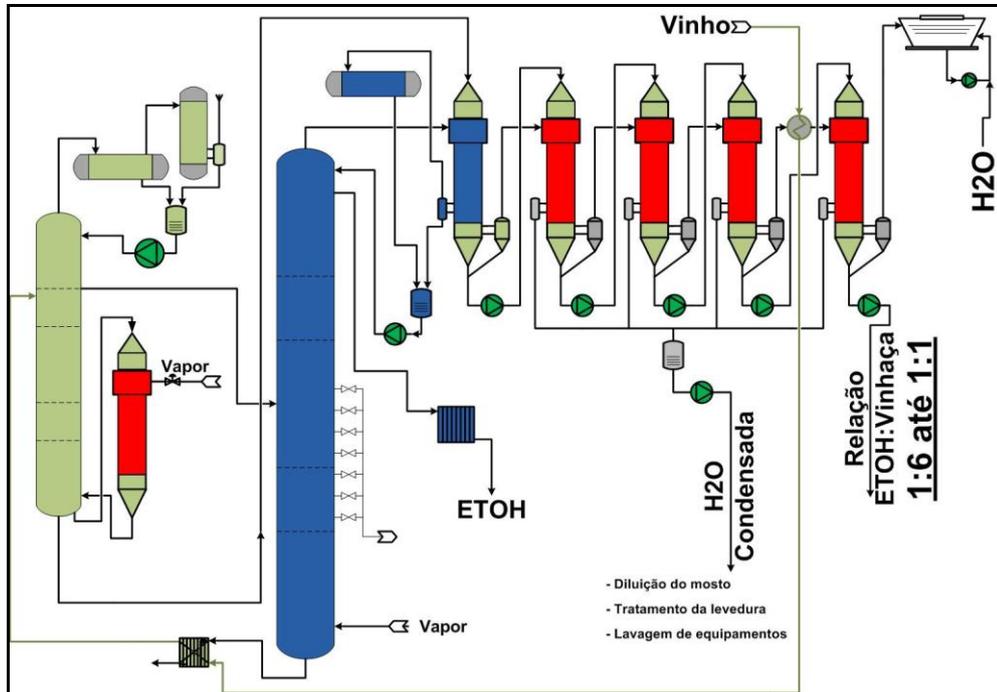


Figura 29: Compress. Fonte: Exal.

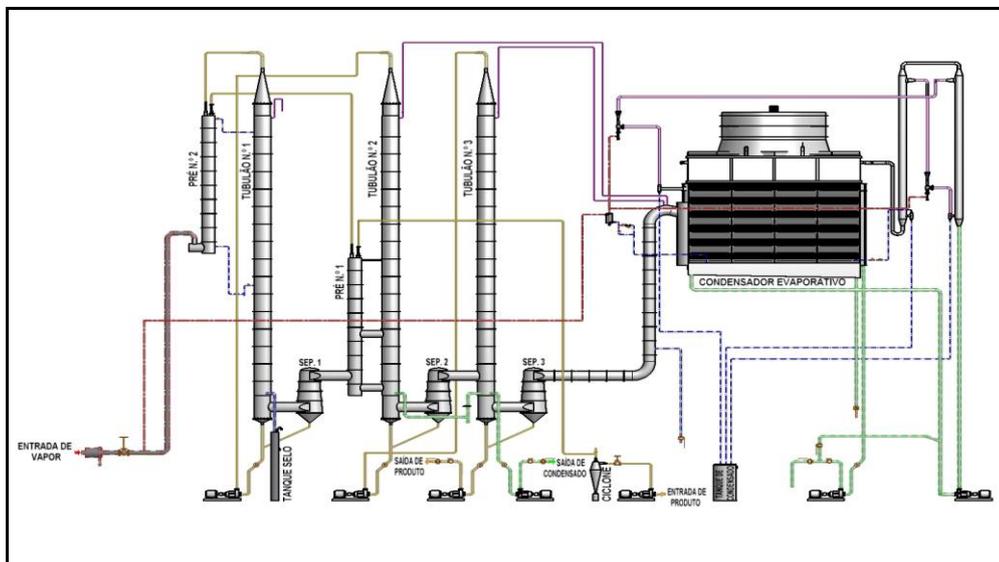


Figura 30: ECoFluid®. Fonte: L&M Engenharia.

Benefícios da Concentração da Vinhaça

- Redução dos custos de transporte e distribuição, viabilizando a aplicação em áreas distantes acima de 30 km. (Custo de transporte e aplicação - R\$ 4,60/m³)

- Possibilidade de utilizar o K_2O da vinhaça realmente como adubo. (Custo do K_2O - R\$ 1,70/kg)
- Redução da necessidade de água na indústria com a utilização do condensado proveniente da evaporação (tratamento do fermento, diluição do mosto, reposição das torres de resfriamento, etc.)
- Torna viável a aplicação em áreas agrícolas com lençol freático de pequena profundidade.
- Adequação da distribuição de vinhaça à Norma P4.231 da CETESB que estabelece:
 - Concentração máxima de potássio: 5% da capacidade da troca catiônica
 - Após o limite: apenas reposição do que é extraído pela cultura (185 kg de K_2O por hectare de corte).

3.3 O Processo de Condensação dos Vapores

Segundo a revista STAB (2012), temos em nossa indústria vários equipamentos dos quais estamos condensando vapor de água em pressões abaixo da pressão atmosférica:

- Filtro rotativo a vácuo.
- Evaporadores de caldo.
- Tachos a vácuo.
- Concentradores de vinhaça.
- Turbinas a vapor de condensação.

Geralmente nos três primeiros equipamentos utilizamos condensadores de contato direto (tipo barométrico, tipo multijato ou outros tipos resultantes da combinação entre os dois) e nos dois últimos equipamentos utilizamos condensadores de superfície, ou seja, condensadores nos quais a troca de calor é feita através de uma superfície de troca térmica.

3.3.1 Condensador Barométrico

Os condensadores barométricos são responsáveis por condensar o vapor vegetal gerado nos evaporadores e cozedores, em importante etapa do processo de produção de açúcar. Por este motivo, a temperatura da água das barométricas não pode estar elevada, a fim de permitir a troca de calor capaz de condensar o vapor vegetal. Após este processo, esta água deve ser resfriada para reutilização. Portanto, necessário se faz controlar os volumes de água envolvidos neste processo, bem como a temperatura da água, que são parâmetros fundamentais no entendimento das demandas de água (quantidade e qualidade) na indústria sucro-alcooleira.

As águas utilizadas nas colunas barométricas representam demanda considerável e apresentam qualidade superior as demais águas residuárias. Segundo BRAILE, (1979) esses equipamentos gastam cerca de 35L de água para condensar um quilo de vapor, porém, como os gases são em parte incondensáveis, deve-se fornecer de 40 a 50 L de água, o que corresponde a, aproximadamente, 12m³/TC. Poucas usinas possuem dados que representem a qualidade e a quantidade desse tipo de água residuária. Dessa forma, é importante que essa avaliação seja feita, a fim de se observar qual a forma de reuso mais indicada para as mesmas dentro do parque industrial. (ANA, 2009).

A figura 31 abaixo representa os três tipos de colunas barométricas utilizadas.

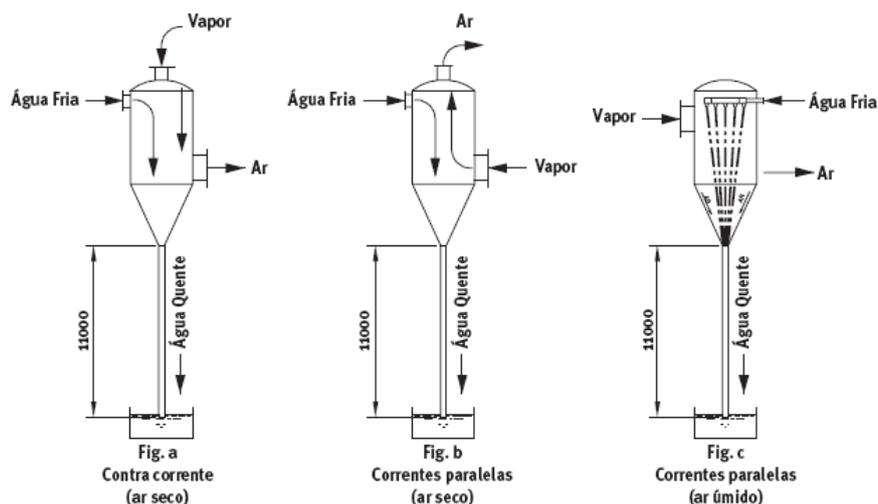


Figura 31: Colunas Barométricas. Fonte: (ANA, 2009).

Quando se considera o equipamento com 5 efeitos e sangrias, como apresentado anteriormente, e condições normais de funcionamento, com temperatura do vapor no último efeito de 54°C e vácuo absoluto de 2,2”Hg, a taxa de uso de água (Tx_{água}) é calculada analogamente ao das colunas dos filtros, através de um balanço de massa e energia no condensador barométrico.

Através de cálculo e com o conhecimento da temperatura da água de resfriamento utilizada e a temperatura de aproximação da condensação, que é de 10°C, para as condições normais de operação, obtemos o valor de 3,83m³/t de cana de açúcar.

Deste modo o condensador demanda um total de água de 3,83 m³/t cana açúcar, tomando-se como referência o valor arredondado de 4 m³/t cana açúcar.

No caso de multijato não há o uso de bombas de ar, porém há um aumento de água para arrastar o ar do condensador. Estima-se um aumento de 20 a 25% do consumo, ou seja, cerca de 4,7 m³/t cana, tomando-se como referência o valor arredondado de 5,0 m³/t cana açúcar para o presente caso. Ressalte-se que o uso de água está associado ao esquema de evaporação adotado, utilizando-se mais água quando se tem menos efeito e não se aproveitando o vapor vegetal para aquecedores e cozedores, podendo chegar a um uso de água até três vezes maior.

3.3.2 Condensador Evaporativo

O condensador evaporativo é um trocador de calor indireto, ou seja, a troca térmica é feita inicialmente através de uma superfície metálica, cuja troca térmica inicial é feita através de contato direto entre o vapor a ser condensado e a água do sistema de resfriamento.

Nos condensadores evaporativos, o vapor a ser condensado é enviado para dentro dos tubos de um feixe tubular de um trocador de calor. Por fora dos tubos é providenciada uma “chuva” de água de resfriamento na temperatura ambiente, água esta que fica em um circuito fechado, o qual deve receber água de reposição de forma constante (geralmente o próprio condensado proveniente do vapor que entra no equipamento ou líquido de selagem da bomba de vácuo). O calor

de condensação transferido para esta “chuva” é removido através da evaporação de água correspondente para uma corrente de ar proporcionada por um ventilador.

Podemos imaginar assim, o condensador evaporativo como sendo uma torre de resfriamento do tipo compacta, dentro da qual fica montado o feixe tubular, cujos tubos condensam em seu interior o vapor do processo. Este feixe tubular normalmente deve ser construído com material resistente à corrosão, aço AISI 304 ou equivalente, pois o vapor do processo a ser condensado costuma ser corrosivo. Os tubos devem ser preferencialmente aletados, pois esta construção favorece a troca de calor no lado da corrente de ar, mas não obrigatoriamente. O feixe tubular é geralmente montado com uma ligeira inclinação, para favorecer a remoção dos condensados de dentro dos tubos e a remoção dos gases incondensáveis pela parte superior.



Figura 32: Condensador Evaporativo. Fonte: LM Engenharia

Segundo Neto (2012) da empresa LM Engenharia, o condensador evaporativo é um trocador de calor que tem como objetivo a condensação dos vapores de um Evaporador ou Cozedor, provocando um gradiente negativo acentuado na pressão interna (vácuo) do equipamento. Nas mais diferentes indústrias de processo, o Condensador Evaporativo está substituindo o Condensador Barométrico e o Condensador de Superfície devido às seguintes vantagens:

- Não requer água externa, eliminado com isso a necessidade de torres de resfriamento, tubulações de transferência e bombas de grande capacidade.
- Extrema facilidade de operação.
- Grande economia de energia elétrica e manutenção.
- Eliminação da necessidade de tratamento de água, uma vez que o equipamento opera com seu próprio condensado.

Ainda segundo Loffredo (2012) Desde a década de 1980 o conceito de condensação evaporativa vem substituindo os condensadores de superfície e colunas barométricas nas aplicações onde requerem a formação de vácuo com reduzido volume de água e potência. As colunas barométricas e multijatos possuem como desvantagens a necessidade de grandes volumes de água, bombas de alta potência, tubulações longas, torres de resfriamento e tratamento de água. Tudo isso gerando um alto custo operacional.

Princípio de Funcionamento

- O vapor entra em um feixe tubular, através de câmaras, onde será condensado e enviado para uma bomba.
- Um sistema de vácuo (ejetores ou bomba) conectado ao feixe tubular faz a retirada dos incondensáveis.
- Uma bomba centrífuga promove a recirculação de água pela parte externa dos tubos através de dispersores.
- Um ventilador instalado no ponto mais alto causa a circulação de ar pelo feixe tubular.
- A ação da água recirculada mais o ar de entrada retira energia do vapor resultando em sua condensação.

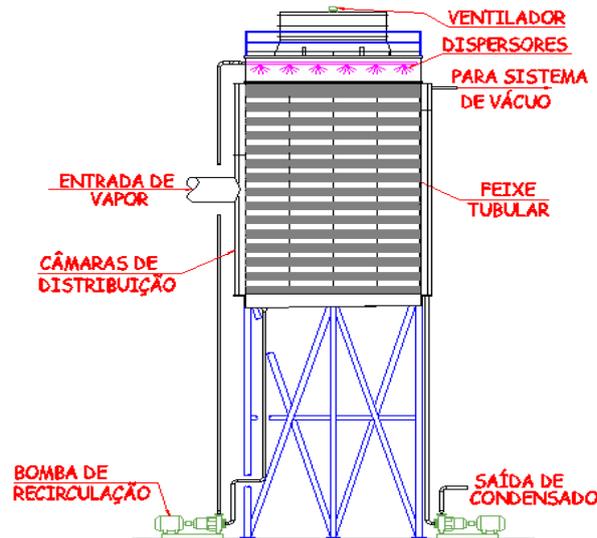


Figura 33: Representação esquemática de um condensador evaporativo.

4. CONCLUSÃO

Podemos constatar que existem novos evaporadores que podem representar grandes benefícios aos atuais sistemas usados na produção de açúcar. Os evaporadores de névoa turbulenta descendente possuem maior eficiência energética e evitam a incrustação tão indesejada no processo de evaporação do caldo.

Mesmo para os tradicionais evaporadores do Tipo Robert que ainda são predominantes no setor sucroenergético brasileiro, também podemos aumentar sua capacidade de troca térmica através de Retrofit que, consiste em acoplar um trocador a placas como sugere a GEA do Brasil.

Também se conclui que o condensador evaporativo aplicado para condensação dos vapores do último efeito do processo de evaporação do caldo e para os cozedores de açúcar, pode representar um ganho extremamente significativo no que se refere ao consumo de água de recirculação.

Apesar ainda, da carência de dados conclusivos destas aplicações no setor sucroenergético, os novos projetos apontam para o uso de equipamentos que reduzam o consumo dos recursos naturais e minimizem o consumo de energia das operações.

O fato de o equipamento dispensar água de recirculação, o coloca em posição de destaque para projetos que visam à sustentabilidade. Principalmente quando se atribui mais de 30% do volume de água de recirculação aos processos de evaporação de uma usina.

A evolução das tecnologias corrobora com esta tendência e cria um cenário muito promissor para estes novos entrantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DELGADO, A.A.; CESAR, M.A.A. **Elementos de tecnologia e Engenharia do Açúcar de Cana – Vol II**. Publique. Piracicaba. São Paulo. 1990.

Manual de Conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética. Agência Nacional de Águas: Federação das indústrias do estado de São Paulo; União da Indústria da Cana-de-açúcar; Centro de tecnologia Canavieira. Brasília: ANA, 2009.

SBR-Sociedade Rural Brasileira.

Disponível em: <http://www.srb.org.br/modules/news/article.php?storyid=5279>
Acesso 20 de setembro de 2012.

Sustentabilidade no setor sucroenergético

Disponível em: http://portal.ftc.br/eventos/sustentabilidade/apresentacao/Sylvio_Coutinho.pdf.
Acesso em 20 de setembro de 2012.

Revista Alcoolbrás – Edição 120/2009.

Disponível em: http://www.revistaalcoolbras.com.br/edicoes/ed_120/mc_2.html
De acordo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2008

Produção Sucroalcooleira – Processo de fabricação de açúcar – Usina Éster.

Disponível em: <http://producaosucroalcooleira.blogspot.com.br/2011/03/o-processo-de-fabricacao-de-acucar-e.html>
Acesso em 02/11/2012.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Portal. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_102_22122006154841.html
Acesso em 02/11/2012.

UNICANA – Números da Safra 2009/2010

Portal. Disponível em: http://www.unicana.com.br/?pagina=previsualizar_noticias&codigo=239
Acesso em 02/11/2012.

Procknor – Condensador Evaporativo

Portal. Disponível em: <http://www.procknor.com.br/products/condensador-evaporativo/>
Acesso em 02/11/2012.

GEA DO BRASIL. Evaporation Technology: Evaporador Falling Film a placas – EVAplus.

Disponível em: <http://www.geadobrasil.com.br/792.0.html?L=>>
Acesso em: 18 de Outubro de 2012.

GEA DO BRASIL. Vapor: como e por que economizar? Parte I. GEA na Usina, boletim nº 07. Novembro, 2007.

Disponível em: <www.geadobrasil.com.br/fileadmin/.../GEA_na_Usina_07.pdf>

Acesso em: 18 de Outubro de 2012.

GEA DO BRASIL. Vapor: como e por que economizar? Parte II. GEA na Usina, boletim nº 08. Dezembro, 2007.

Disponível em: <www.geadobrasil.com.br/fileadmin/.../GEA_na_Usina_08.pdf>

Acesso em: 18 de Outubro de 2012.

GEA DO BRASIL. Vapor: como e por que economizar? Parte III. GEA na Usina, boletim nº 09. Janeiro, 2008.

Disponível

em:

www.geadobrasil.com.br/fileadmin/user.../do.../GEA_na_Usina_09.pdf

Acesso em: 18 de Outubro de 2012.

GUT, J.A.W; PINTO, J.M. Conhecendo os trocadores de calor a placas.

Departamento de Engenharia Química – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.hottopos.com/regeq11/gut.htm>>

Acesso em: 26 de Outubro de 2012.

L&M ENGENHARIA. ECoFluid® - Evaporador para concentração de fluidos.

Disponível em: <<http://www.lme.com.br/ECV.html>>

Acesso em: 02 de Novembro de 2012.

L&M ENGENHARIA. ECoFluid® - Evaporador para concentração de vinhaça.

Disponível em: <<http://www.lme.com.br/E.C.F.html>>

Acesso em: 02 de Novembro de 2012.

L&M ENGENHARIA. Tecnologia.

Disponível em: <<http://www.lme.com.br/Tecnologia.html>>

Acesso em: 02 de Novembro de 2012.

NOVA AMÉRICA. Processos de produção: Açúcar.

Disponível

em:

http://www.novamerica.com.br/institucional/ProdutosServicos/prod_consumidor_sobre_acucar_processo.jsp

Acesso em: 20 de Agosto de 2012.

SALLA, A. Robert: Como aumentar a capacidade? Parte I. GEA na Usina, boletim nº 12. Abril, 2008.

Disponível em: <www.geadobrasil.com.br/fileadmin/.../GEA_na_Usina_12.pdf>

Acesso em: 20 de Agosto de 2012.

SALLA, A. Robert: Como aumentar a capacidade? Parte II. GEA na Usina, boletim nº 13. Maio, 2008.

Disponível

em:

<www.geadobrasil.com.br/fileadmin/user.../do.../GEA_na_Usina_13.pdf>

Acesso em: 20 de Agosto de 2012.

TAMBELLINI, C.A. Evaporação e Cozimento. Revista Opiniões sobre o Setor Sucroenergético. Dezembro, 2005.

Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=296>>

Acesso em: 20 de Agosto de 2012.