

# Aspectos Técnicos e Operacionais na Evaporação do Caldo de Cana



**CALICHMAN**  
CONSULTORIA EM PROCESSOS E PROJETOS INDUSTRIAIS

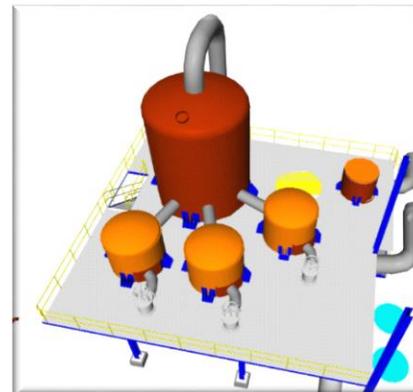
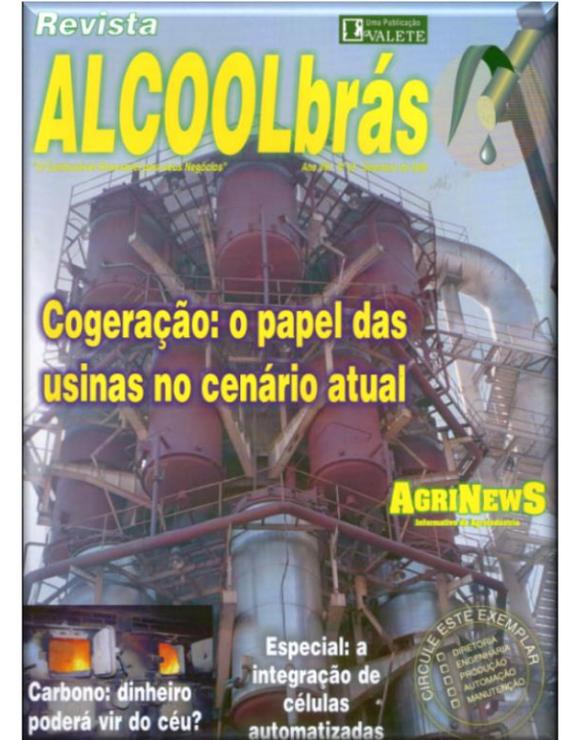


**Eduardo Calichman**  
**19 99687 9461**

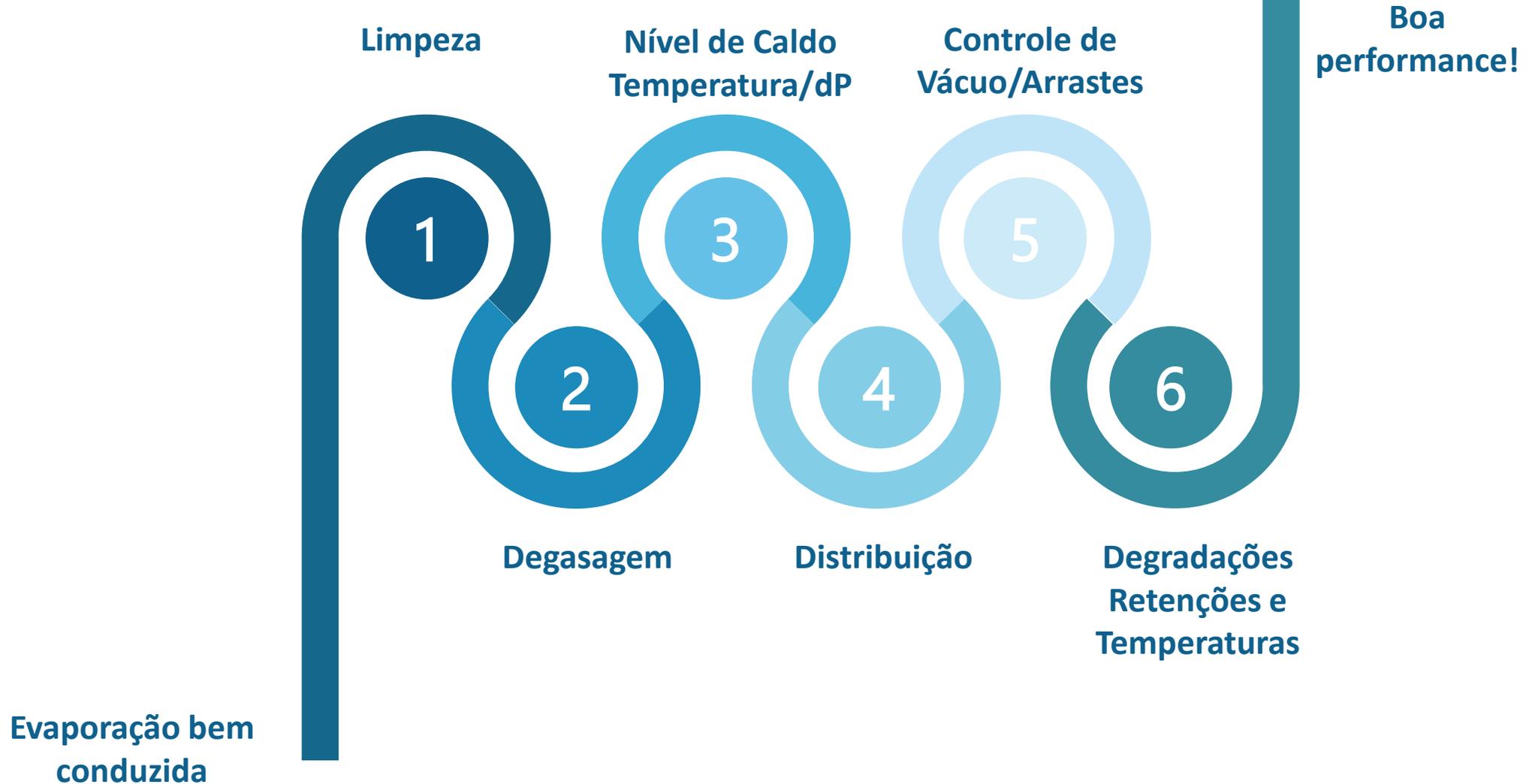
08.05.2019 <sup>1</sup>



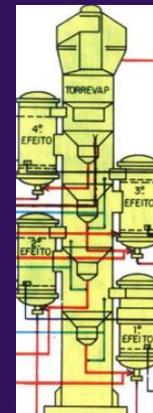
# Tipos de Evaporadores



# Alavancas Operacionais na Evaporação



# Tipos de Evaporadores e “Preferências”



# Tipos de Evaporadores



Excelência  
Operacional

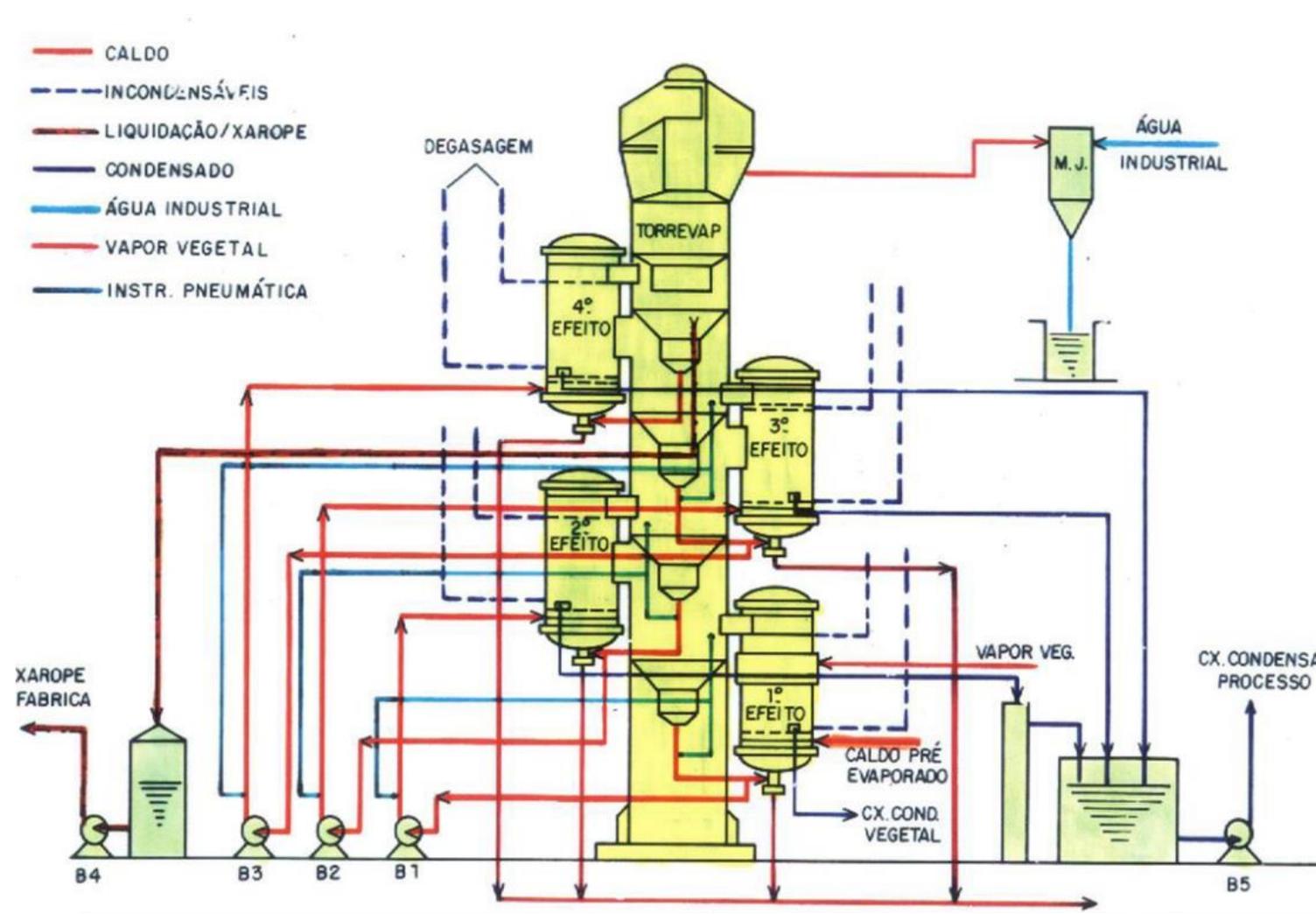
01

O bom evaporador é o evaporador operado e entendido na sua melhor forma.

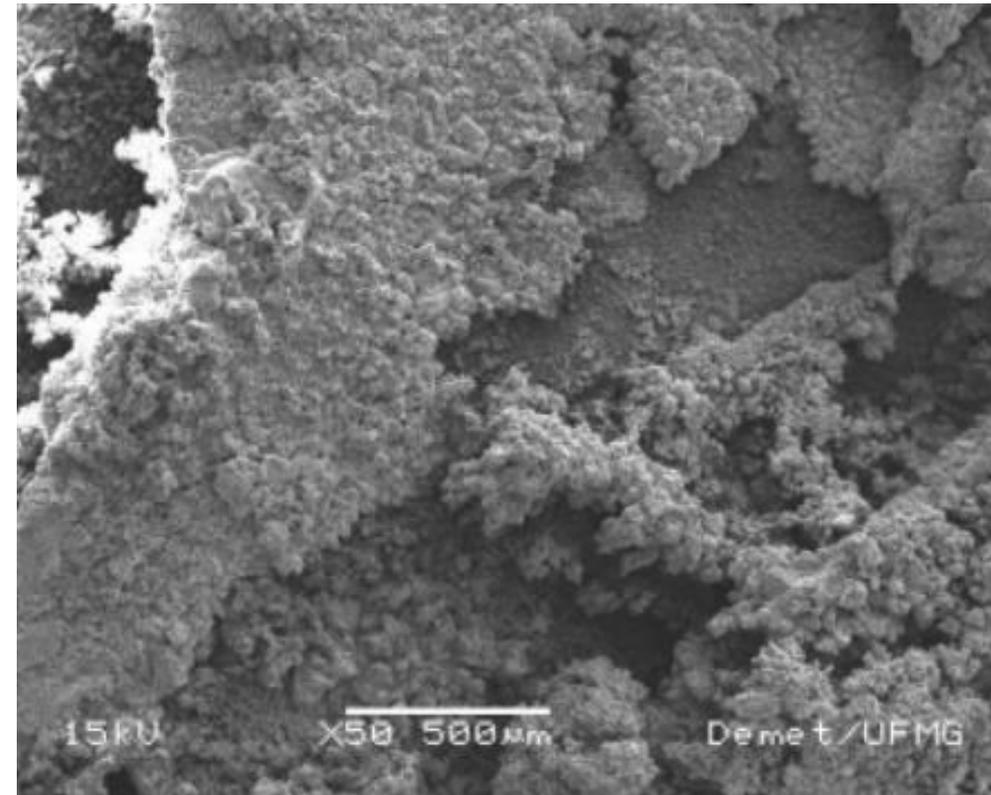
Utilizando-se dos conceitos básicos da evaporação.

Avaliação EXERGÉTICA.

# Tipos de Evaporadores e “Preferências”

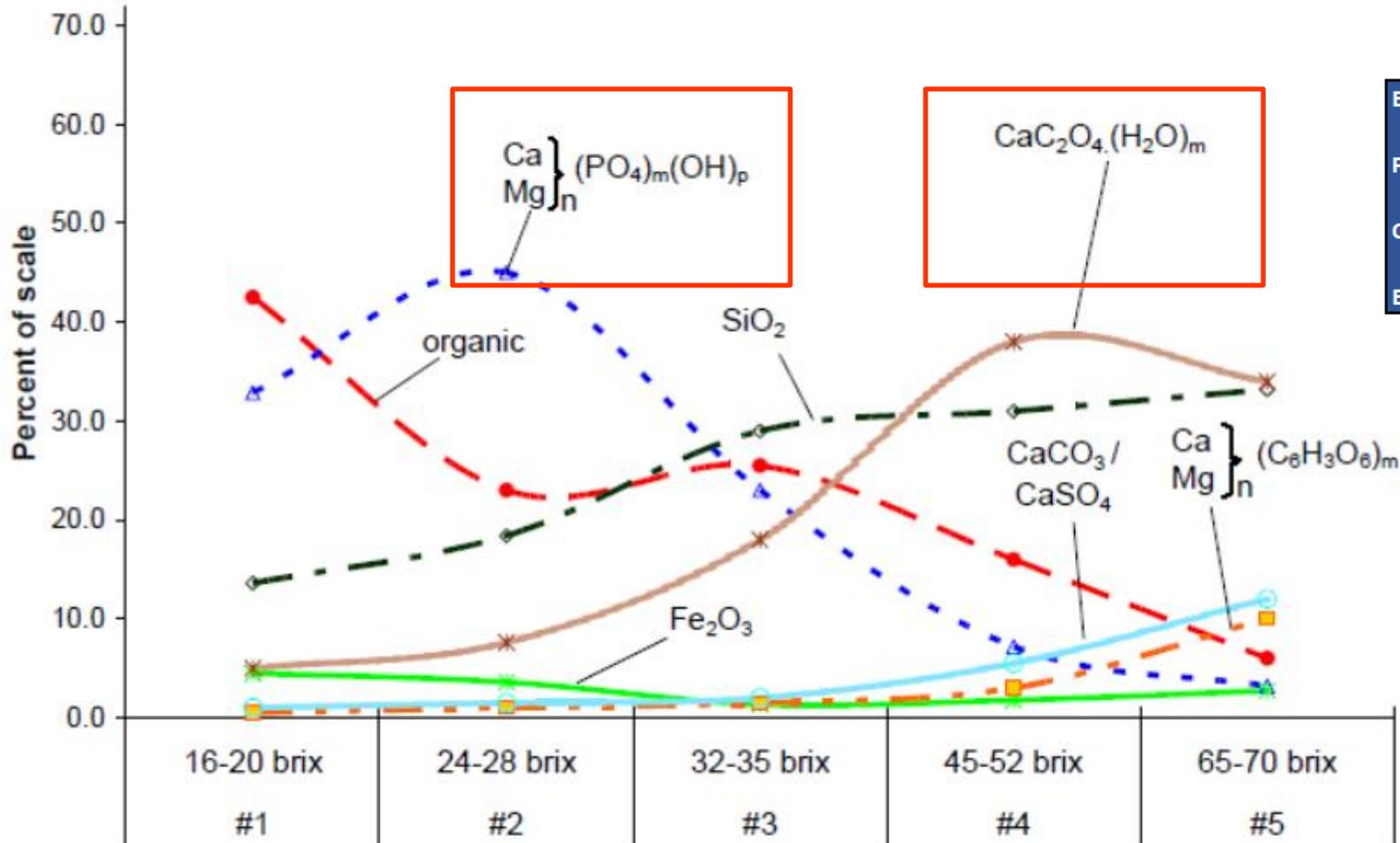


## Incrustações:



Fonte: Nivaldo Ferreira – Limpeza da Evaporação

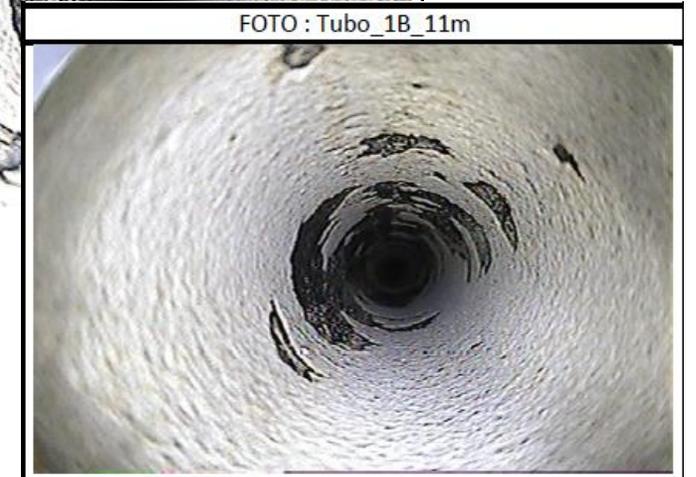
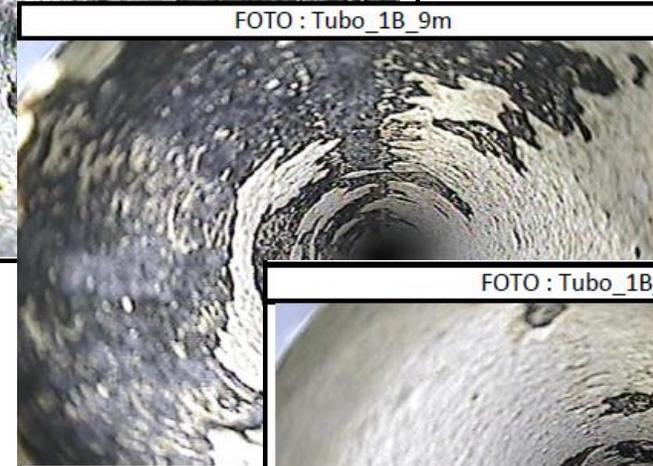
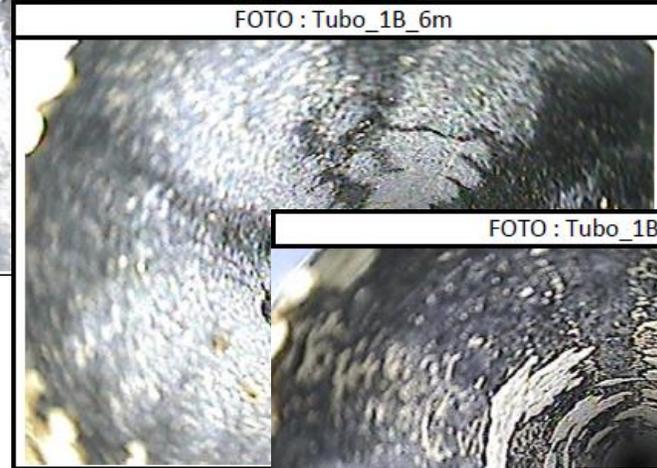
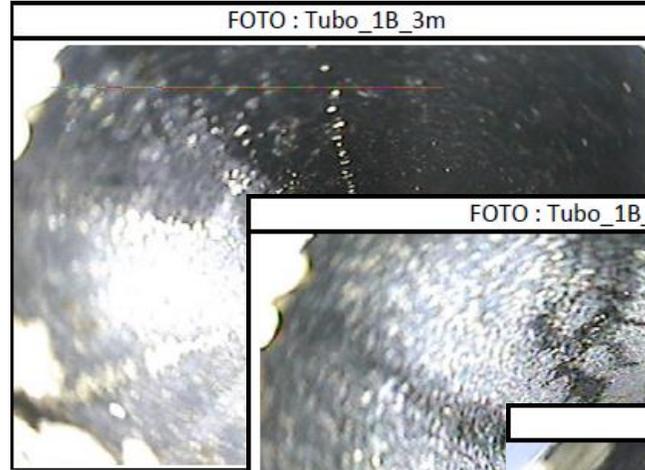
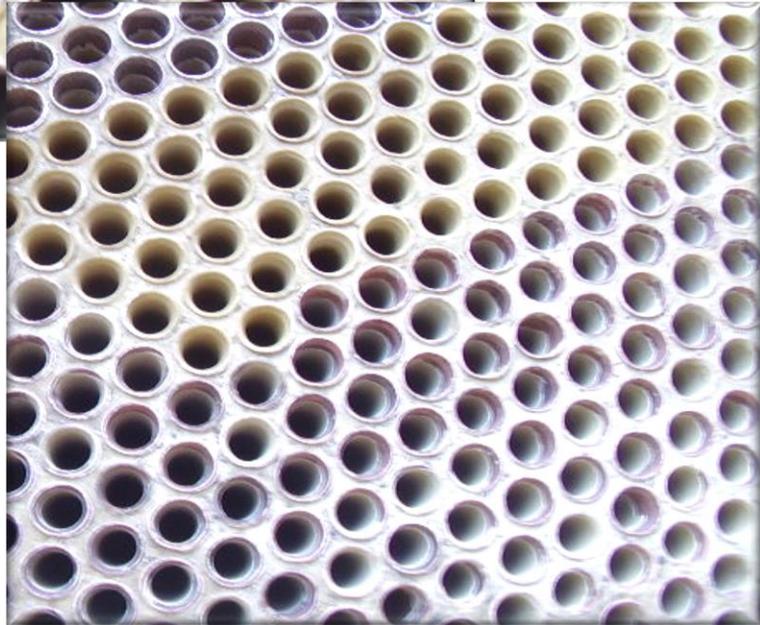
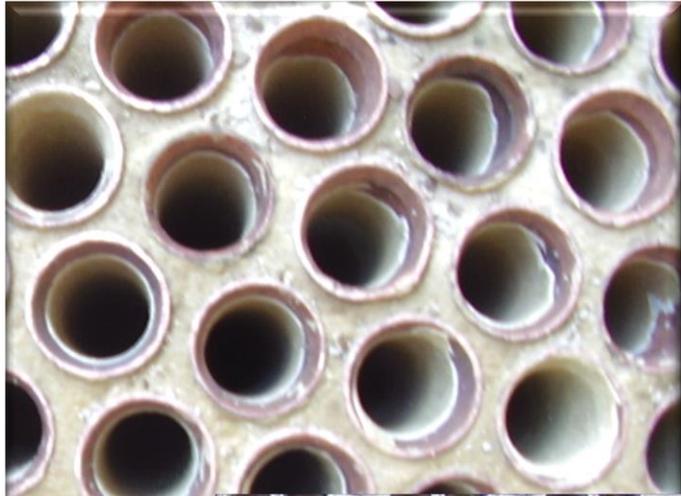
## Incrustações:



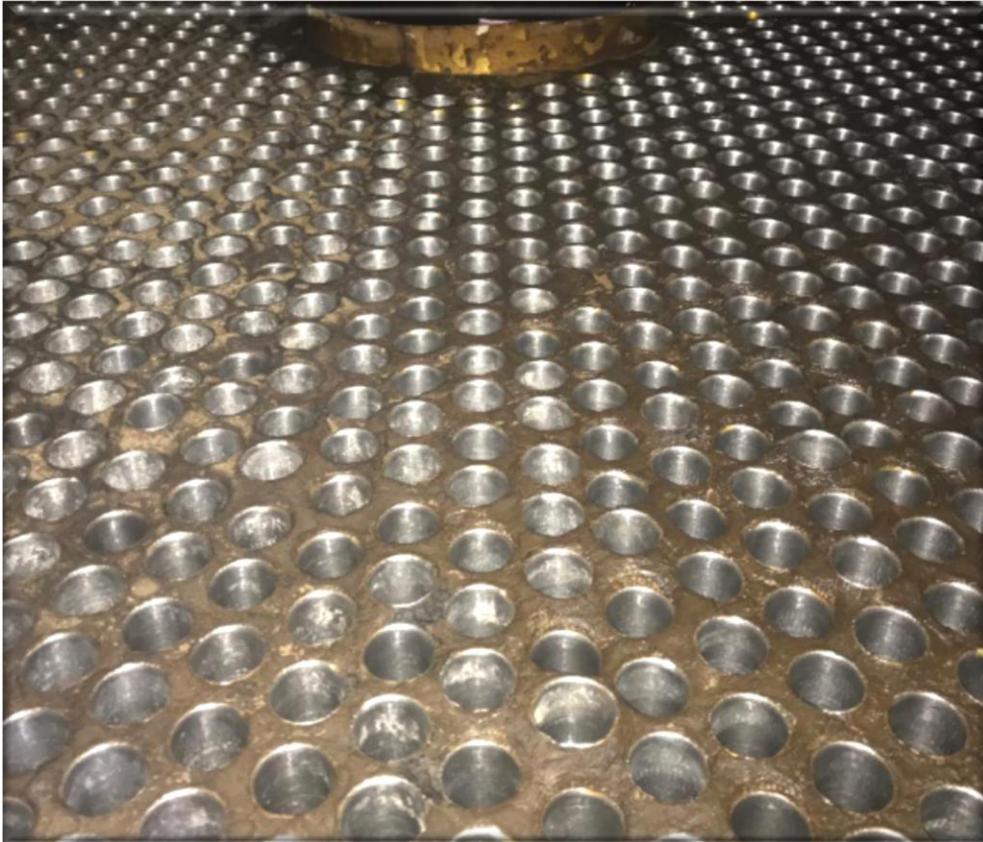
Evaporador	Efeito				
	1	2	3	4	5
Fosfato de Cálcio%	65	70	63	39	12
Oxalato de Cálcio%	0,3	0,3	2,9	26,5	52
Espessura (mm)	0,46	1,3	0,54	0,6	0,85

Fig. 1—Percent of various components in scale across a quintuple evaporator set.

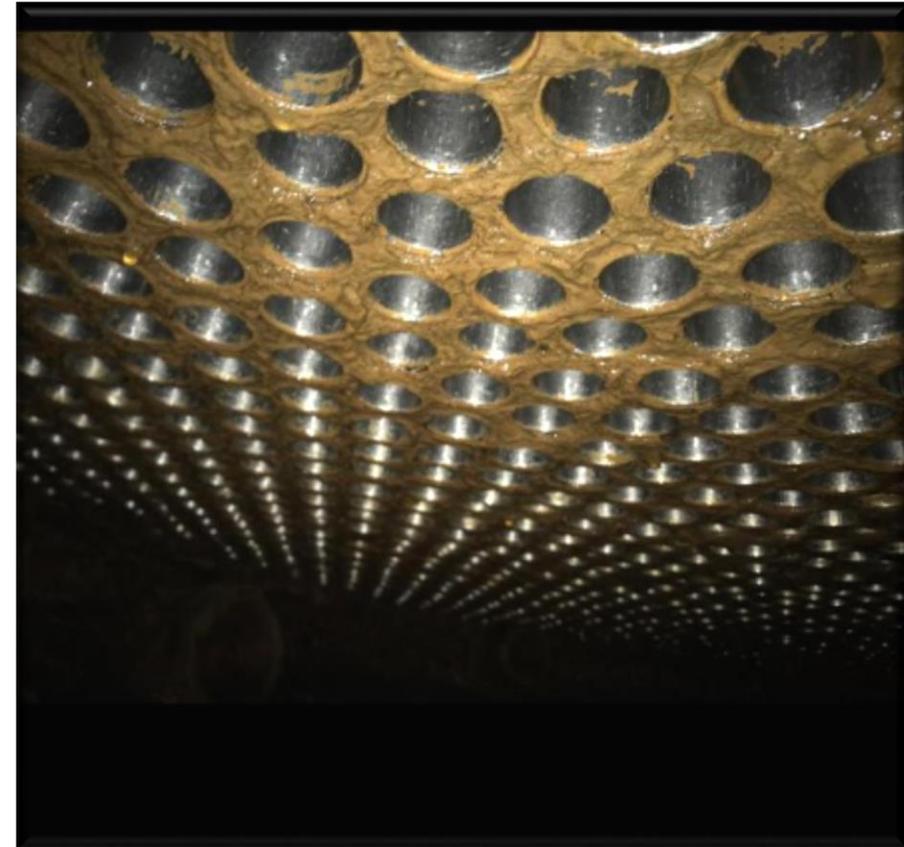
# Evaporação: Limpeza Efetiva



# Evaporação: Limpeza Efetiva



**Pós limpeza- Superior**



**Pós limpeza- Inferior**

**Drenar Rinse e retirar sujidades antes de iniciar a operação**  
**Filtrar a soda recuperada e rinse para não enviar sujeira às etapas posteriores**

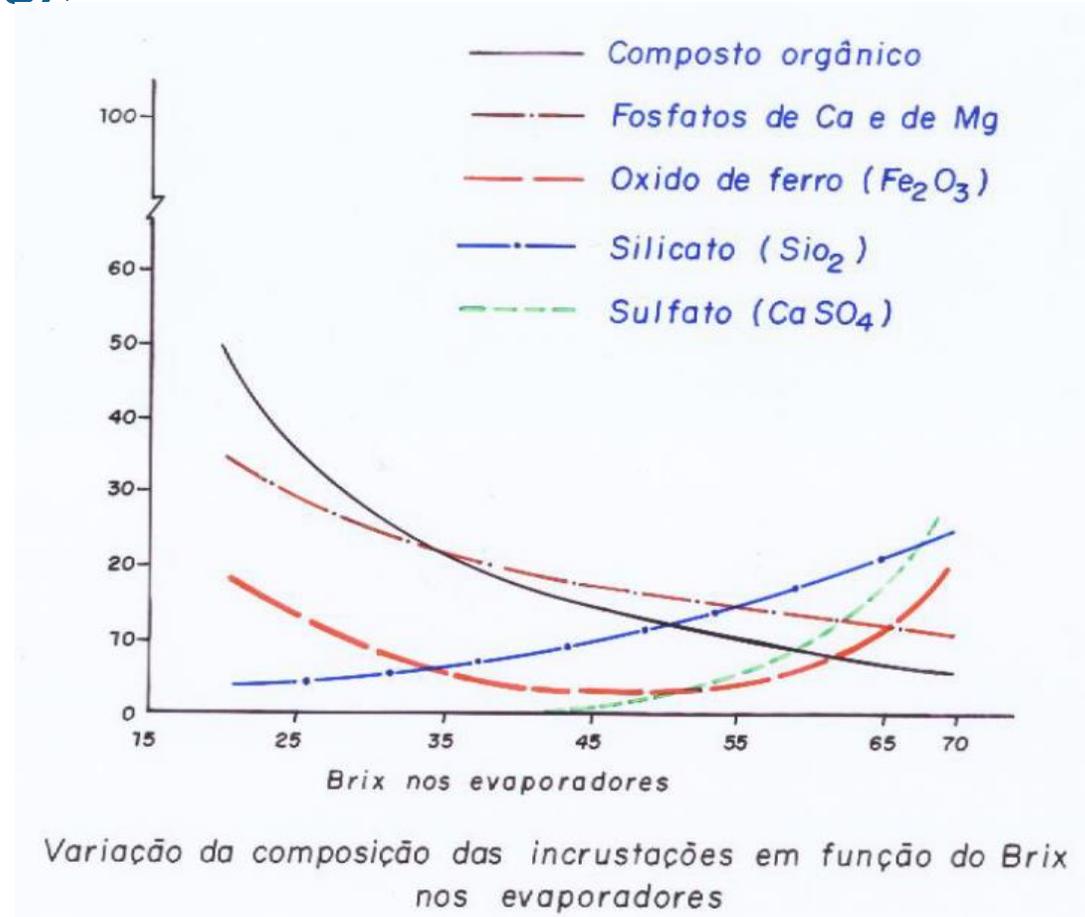
Um dos fatores que usualmente mais impacta o funcionamento dos evaporadores refere-se às incrustações formadas pela saturação e deposição de sais nas paredes dos tubos. A camada formada funciona como isolante térmico (fouling), dificultando a transmissão do calor dos tubos para o caldo.

Sichter et al. (2003) report an equation used in Australia to predict the rate of fall-off in heat transfer coefficient:

$$k = k_0 \cdot \exp(-c'' \cdot \tau/100) \quad (12.55)$$

where  $k$  is the value after  $\tau$  hours. The coefficient  $c''$  has the value of 0.19 for a *Robert* evaporator and a value between 0.18 and 0.26 for a falling film plate evaporator.

Fonte: Peter Rein / Cane Sugar handbook



# Evaporação: Impactos das Incrustações



CALICHMAN

COMPOSTO QUÍMICO	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (kcal/m * h * °C)
Incrustação em Base de Sílica	0,2 ~ 0,4
Incrustação em Base de Carbonato	0,4 ~ 0,60
Incrustação em Base de Sulfato	0,6 ~ 2,0
Liga de Aço Carbono	40 ~ 60
Liga de Cobre	320 ~ 360

Fonte: Nivaldo Ferreira – Limpeza da Evaporação - SBA

# Evaporação: Limpeza Efetiva

- 1- Fervura da evaporação com NaOH 10% @ 25% por tempo suficiente e posterior Rinse e Resfriamento.
- 2- Uso de Hidrojateamento com ao menos 1000bar efetivos (pressão net com 2 ou 3 bicos).
- 3- Se possível, retirada dos sólidos antes da recuperação da Soda Cáustica para reuso.
- 4- Uso de rosetas e limpeza mecânica, menos encontrada.
- 5- Limpeza Química
- 6- Avaliação pós limpeza com gabaritos (“passador”) 35mm p.ex.
- 7- Avaliação da eficácia de limpeza com Endoscópios.

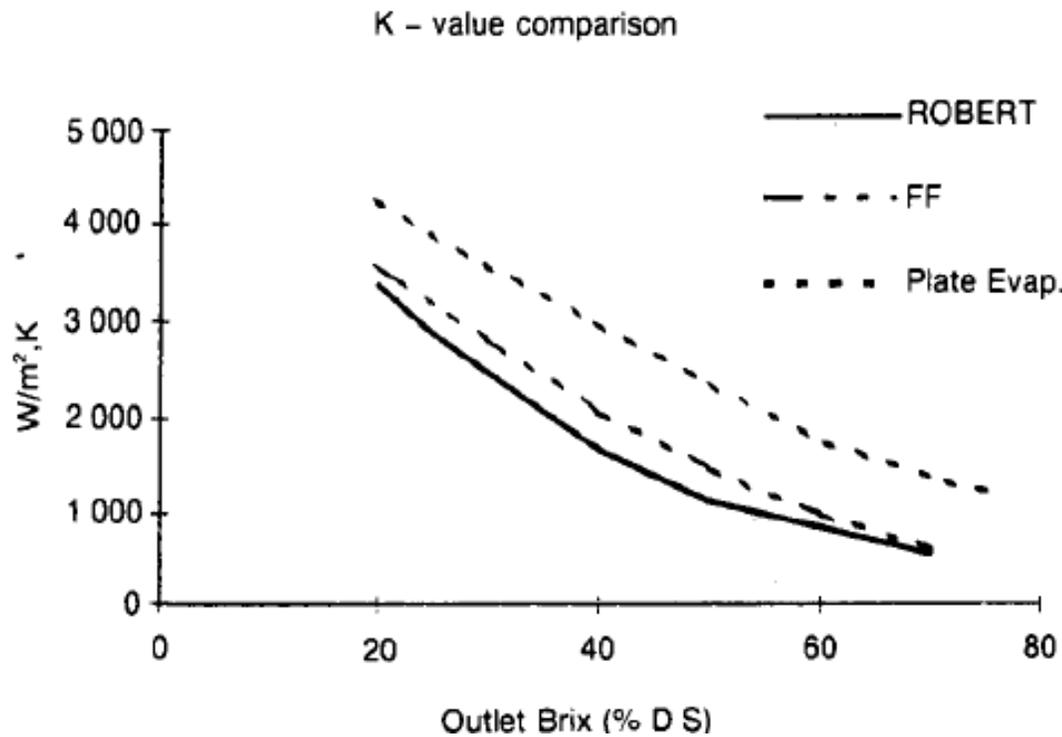
# Evaporação: Impactos das Incrustações



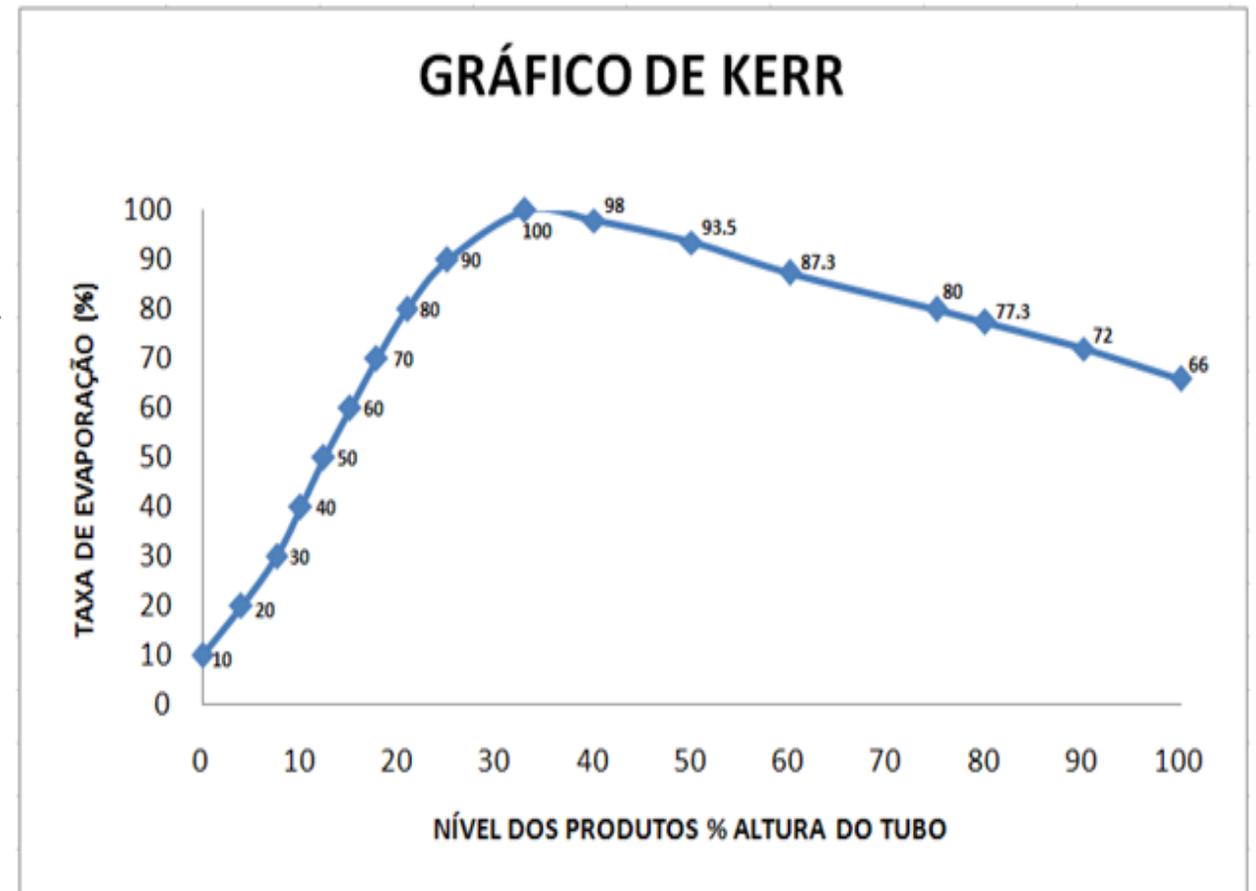
CALICHMAN

Menor a taxa de troca térmica....menor o Brix.

Nível de Trabalho Alto: AUMENTO DE TEMPO DE RETENÇÃO e EPE



Comparison of heat transfer coefficients (k values) (Licha et al., 1989).



(1) Preevaporador calentado con vapor directo a 2.5 o 3 kg/cm<sup>2</sup> de presión absoluta, siendo la presión dentro del cuerpo de alrededor de 0.5 a 0.6 kg/cm<sup>2</sup> efectivos, 3 000 kcal/hora/m<sup>2</sup>/grado aparente.

(2) Múltiple efecto:

	Triple	Cuádruple	Quíntuple
1er. cuerpo . . . . .	2 000 a 2 200	2 000	2 000
2o. cuerpo . . . . .	1 400 a 1 500	1 400	1 400
3er. cuerpo . . . . .	600 a 700	900 a 1 000	1 000
4o. cuerpo . . . . .		400 a 500	700 a 750
5o. cuerpo . . . . .			400 a 450

TABLA 73. COEFICIENTES DE EVAPORACION

Simple efecto	100 kg/h/m <sup>2</sup> de superficie total
Doble efecto	50 kg/h/m <sup>2</sup> de superficie total
Triple efecto	33 kg/h/m <sup>2</sup> de superficie total
Cuádruple efecto	25 kg/h/m <sup>2</sup> de superficie total
Quíntuple efecto	20 kg/h/m <sup>2</sup> de superficie total

a evaporación de un cuerpo cualquiera, de cualquier múltiple efecto:

$$c = 0.001 (100 - B) (T - 54) \quad (300)$$

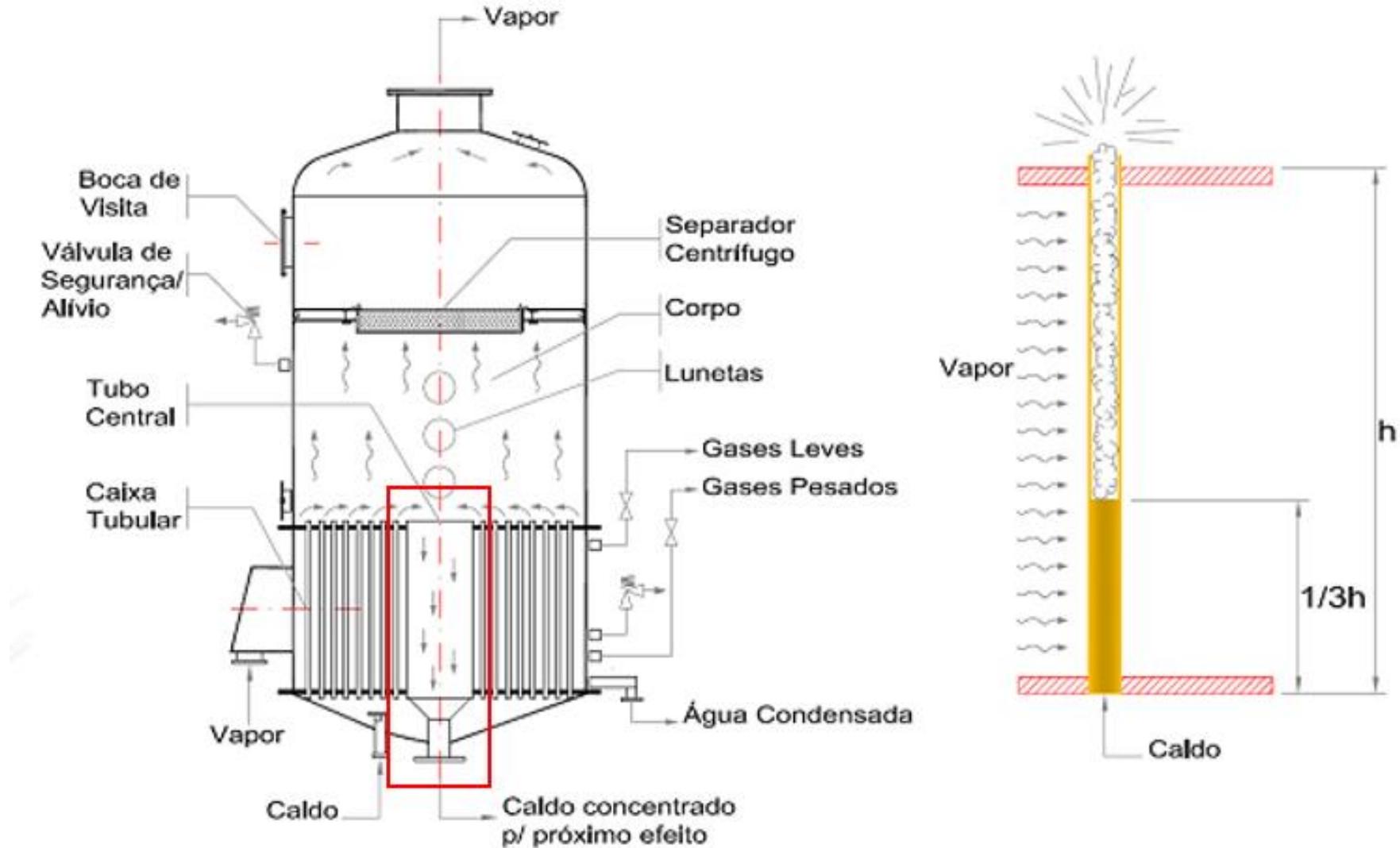
Fonte: Hugot Manuel de Engenharia Açucareira

- Qual a frequência de efetuar-se CURVAS DE BRUX atualmente?
- O mesmo para cálculos de taxa de evaporação?
- Oportunidades em Automação !

# Evaporação: Nível de Operação



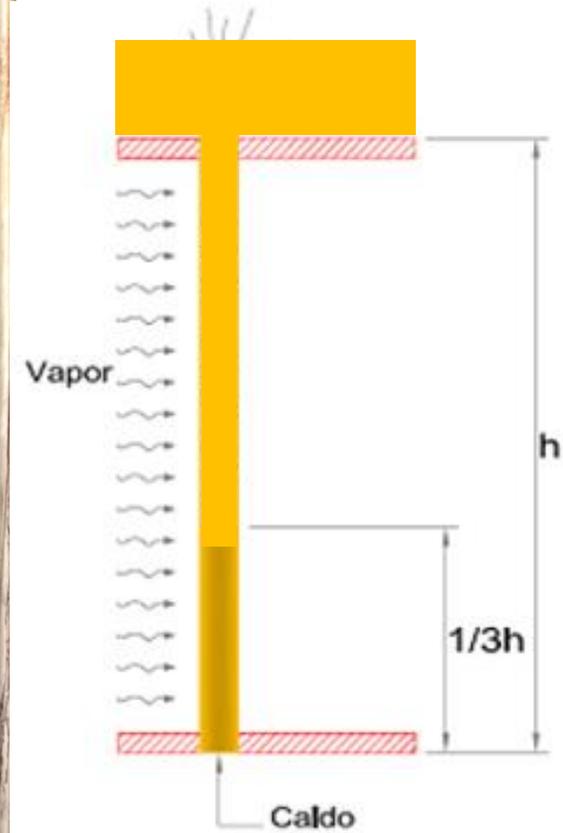
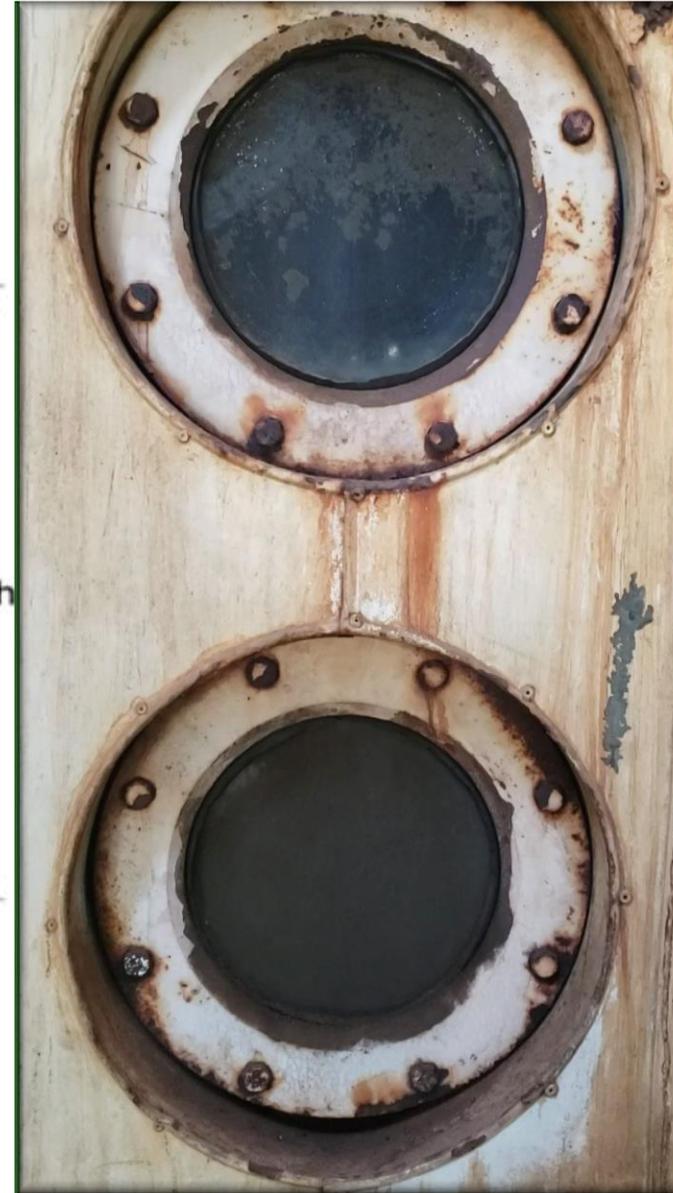
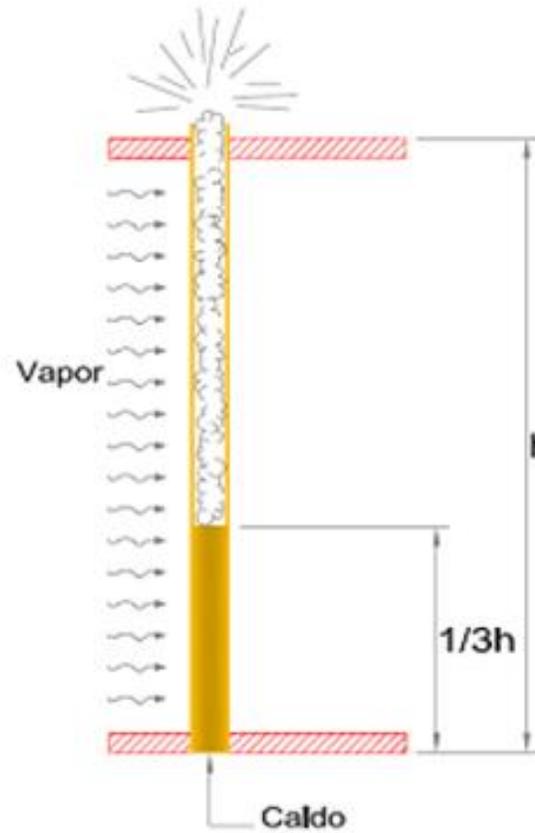
CALICHMAN



# Evaporação: Nível de Operação



CALICHMAN

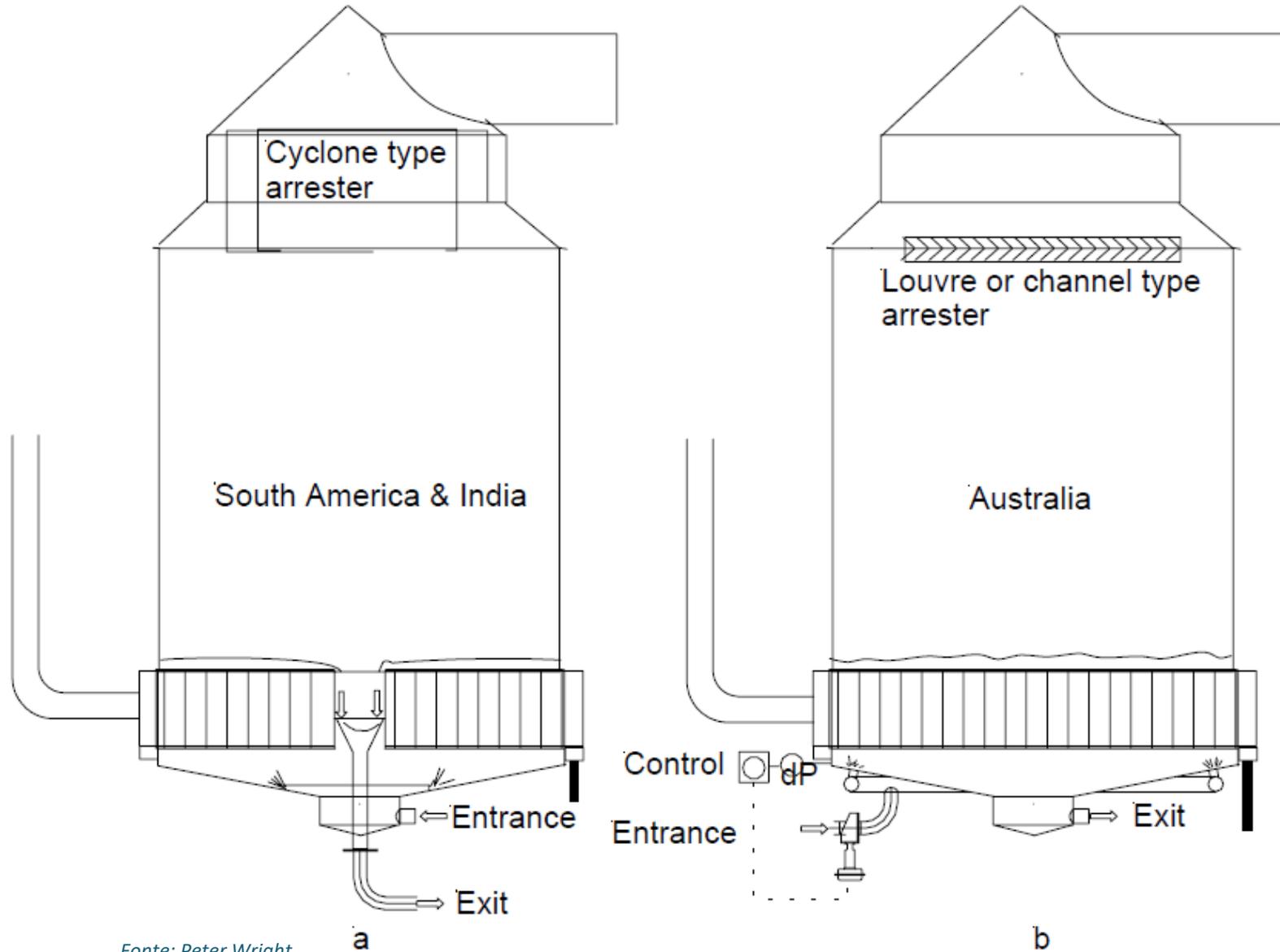


**E.P.E.**

# Evaporação: Recirculação...



CALICHMAN

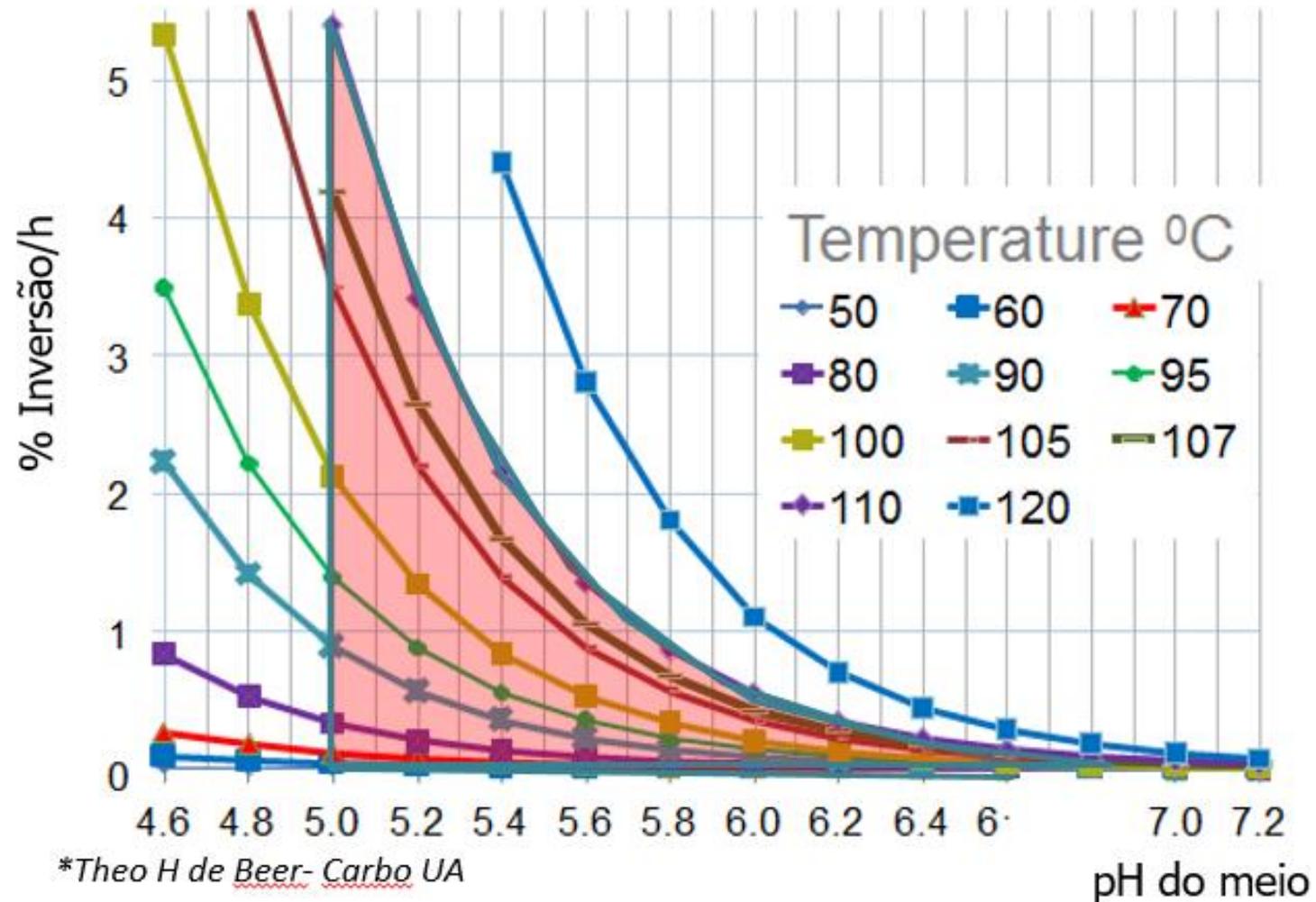


Acervo Pessoal

Fonte: Peter Wright

# Evaporação: Degradações e Inversão

% Sucrose Inversion / hour at  
Different Temperatures and pH



\*Theo H de Beer- Carbo UA

## PORCENTAGEM DE SACAROSE INVERTIDA POR HORA

Temperatura °C	pH					
	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0
50	0,001	0,0006	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001
60	0,0035	0,0022	0,0014	0,0009	0,0006	0,0004
70	0,0011	0,007	0,0044	0,0026	0,0018	0,0911
80	0,033	0,021	0,013	0,0083	0,0052	0,0033
85	0,053	0,034	0,022	0,013	0,0084	0,0053
90	0,089	0,056	0,035	0,022	0,014	0,0089
95	0,14	0,088	0,055	0,035	0,022	0,014
100	0,21	0,13	0,084	0,053	0,034	0,021
105	0,35	0,22	0,14	0,088	0,056	0,035
110	0,54	0,34	0,22	0,14	0,086	0,054
120	1,1	0,7	0,44	0,28	0,18	0,11

- De acordo com a tabela de Stadler a redução de 1,0 ponto no pH aumenta a inversão 10 vezes.
- Com pH 6,0, passando a temperatura do caldo de 100 °C para 110°C
- (10°C), a taxa de inversão aumenta em 157 %, e se o pH 7,0 a 100°C abaixar para 6,0 com elevação da temperatura para 110°C a taxa de inversão aumenta em 2471 %.

# Evaporação: Degradações e Inversão



CALICHMAN

<b>Estimativa de tempo de residência (Roberts)</b>				
Efeito	1	2	3	4
Vazão entrada caldo (t/h)	500,0			
Vazão de saída (t/h)	320,0	160,0	140,0	120,0
Evap. area, m <sup>2</sup>	5000	3000	2416	1208
Comprimento tubo (mm)	2500	2500	2000	2000
Diam int tubo (mm)	35	35	35	35
Espessura do tubo (mm)	1,2	1,2	1,2	1,2
Diam ext tubo (mm)	38,1	38,1	38,1	38,1
Altura operação, % comp do tubo	30	30	30	30
Área secção transversal (mm <sup>2</sup> )	962	962	962	962
Volume de caldo em cada tubo (l)	0,722	0,722	0,577	0,577
Volume de caldo abaixo dos tubos (l)	0,770	0,770	0,770	0,770
Densidade Caldo, kg/m <sup>3</sup>	1,032	1,106	1,135	1,208
Coef termic Caldo, J/(kg K)	3792	3440	3298	2878
Numero de Tubos	16709	10026	10094	5047
Volume Total de Tubos (m <sup>3</sup> )	24,917979	14,950787	13,596214	6,7979944
Volume total de caldo (m <sup>3</sup> )	36,138287	21,682972	17,464912	8,7323112
Massa total de caldo (ton)	37,290121	23,982736	19,823273	10,54431
<b>Tempo de residência aprox (min)</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>	<b>7,9</b>	<b>4,9</b>
<b>Tempo de residência total aprox (min)</b>	<b>24,2</b>			

# Evaporação: Degradações e Inversão

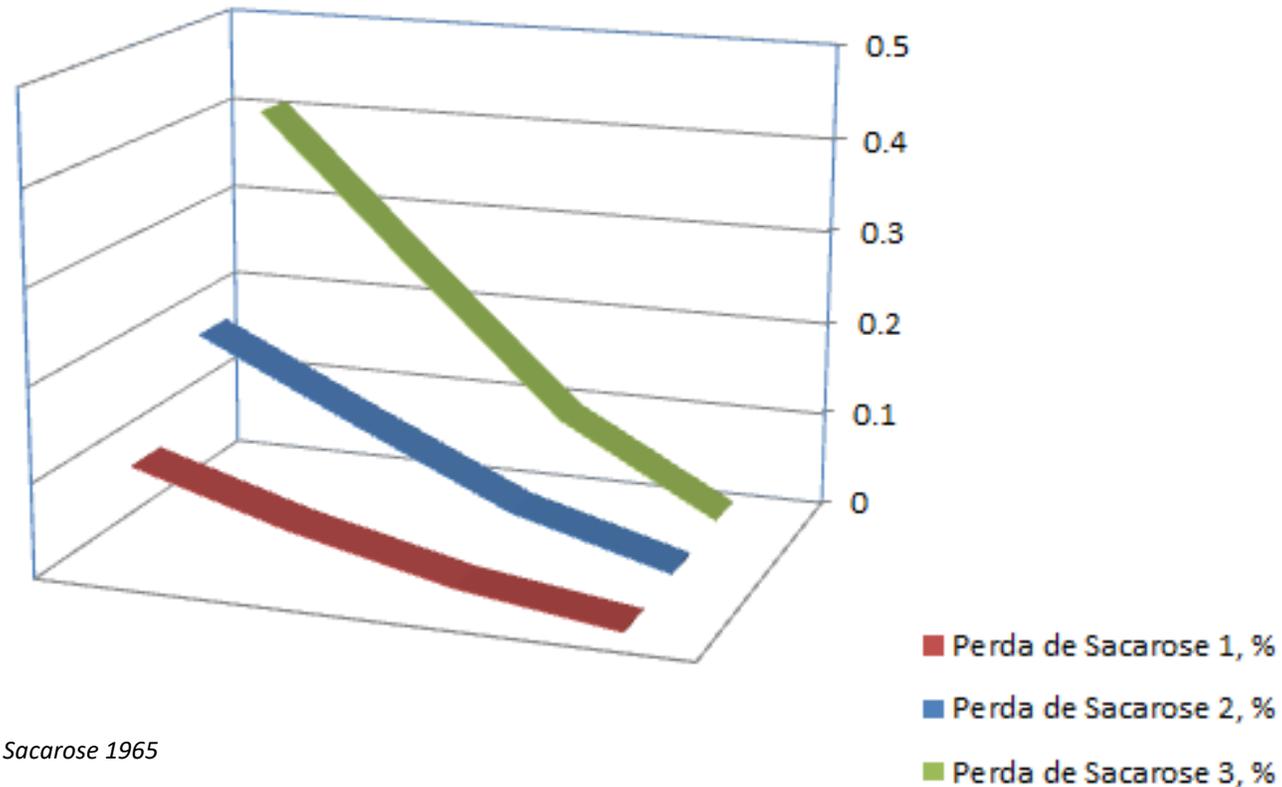


CALICHMAN

Tempo de residência (min)	5.5	6.0	7.9	4.9
Perda de Sacarose 1, %	0.112396	0.063032	0.02448	0.000914

Tempo de residência (min)	10.0	12.0	16.0	18.0
Perda de Sacarose 2, %	0.205867	0.126115	0.04939	0.003381

Tempo de residência (min)	20.0	24.0	32.0	36.0
Perda de Sacarose 3, %	0.41131	0.252071	0.098756	0.006761

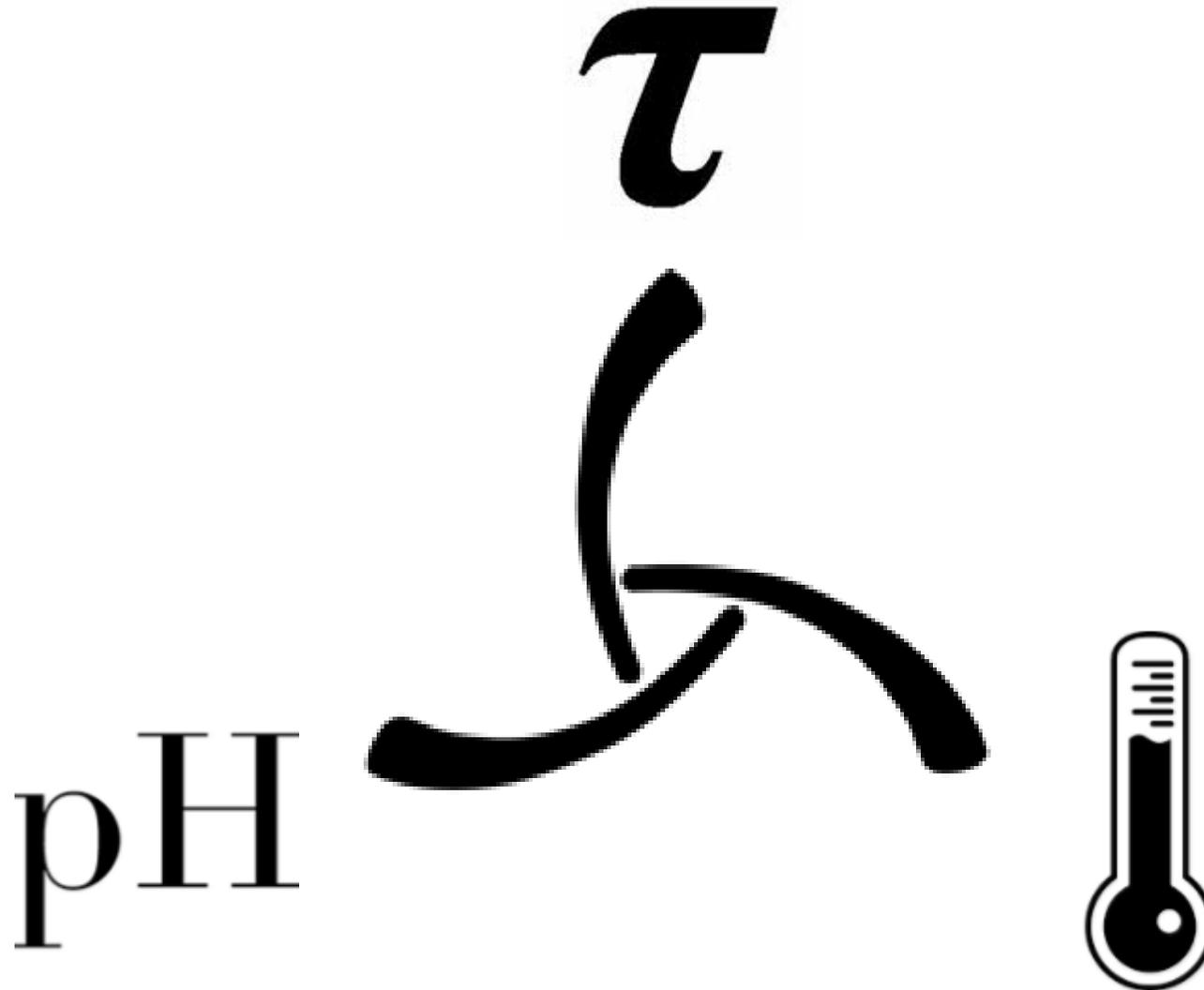


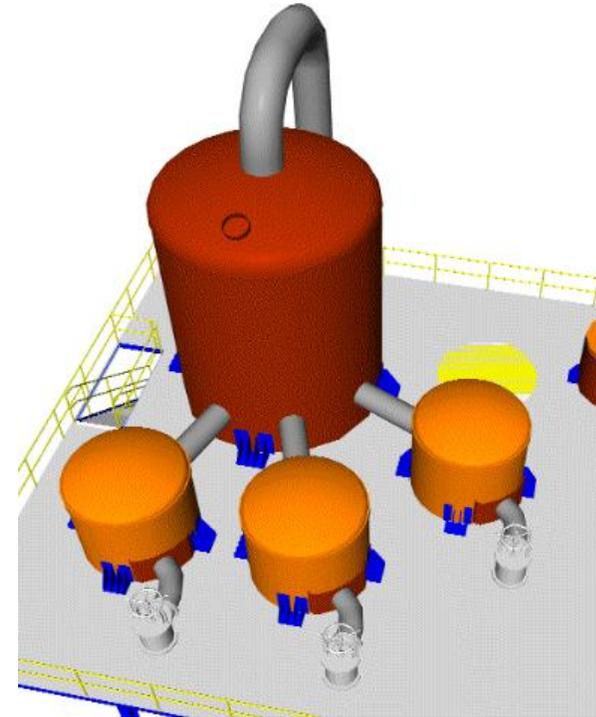
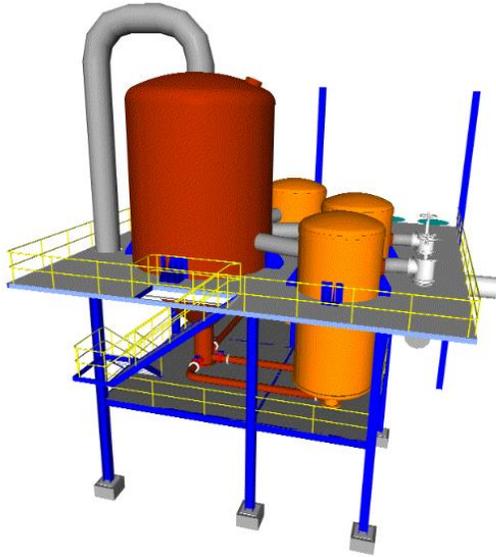
Ref. Dr Peter Wright – 2006

VUKOV – Formula de Destruição da Sacarose 1965

Fonte: Acervo Pessoal







“...vantagem é a facilidade de se ajustar a evaporação ao processo, retirando-se ou colocando-se um reboiler, ou mesmo reduzindo ou aumentando a abertura da válvula de entrada de vapor”.

*Zarpelon STAB - julho/agosto - 2003*

# Evaporação: Degradações e Inversão

## Compatibilização de Áreas de Evaporação X Moagem e Mix



# Evaporação: Impactos das Degasagens

O vapor de escape contém uma pequena quantidade de ar e outros gases oriundos do caldo que são incondensáveis e que podem se acumular dentro das calandras formando verdadeiros “bolsões” de ar/gás.

Outro efeito grave é quando ocorre a entrada de ar falso nos efeitos (vazamentos) que operam sob vácuo. Nestes corpos as degasagens não são logicamente atmosférica, elas devem ser conduzidas aos efeitos seguintes ou ainda ao multijato.

Como o coeficiente de transmissão do ar e dos gases são baixíssimo comparados ao vapor saturado, há uma redução da capacidade evaporativa caso os “bolsões” de incondensáveis não sejam retirados.

A retirada destes gases ocorre por tubulações instaladas nas calandras, preferencialmente em posições opostas às entradas de vapor, onde devem se acumular.

Existe uma polêmica no setor Sucroalcooleiro à respeito da retirada de gases “leves” e “pesados” sendo que na prática, vários testes foram efetuados e motivados por Florenal Zarpelon, indicando que a retirada de gases pela parte inferior das calandras eliminam praticamente a totalidade de incondensáveis.

## LOS GASES INCONDENSABLES

Al iniciar la marcha de un múltiple efecto es necesario hacer un vacío conveniente en las diversas calandrias.

Por otro lado, en la marcha normal, el vapor que llega a la calandria lleva con él aire y gases extraños. Estos se originan:

(a) De los gases disueltos en el jugo, liberados por la ebullición. En la remolacha se encuentra amoniaco. En la caña principalmente aire.

(b) Del aire arrastrado por el vapor de escape. En general el vapor contiene muy poco. (Este aire es introducido por los condensados que lo contienen en disolución).

(c) Del aire que entra por las fugas en las juntas de la calandria y de los cuerpos en las válvulas, en las mirillas, etc. Esta es la cantidad más importante.

De aquí se deduce que:

(1) Los gases extraños e "incondensables" están formados casi únicamente de aire.

(2) La cantidad de gases incondensables es muy pequeña en los cuerpos calentados con vapor de escape (aire *b*): primer cuerpo del múltiple efecto. Es mucho más importante en los cuerpos calentados con vapor de jugo (aire *a*), como es el caso del segundo cuerpo, y sobre todo de los cuerpos al vacío (aire *a* + aire *c*).

**Muitos poucos incondensáveis no Vapor de Escape**

**Alguns gases amoniacais (para Beterraba)**

**Basicamente ar advindo de vazamentos**

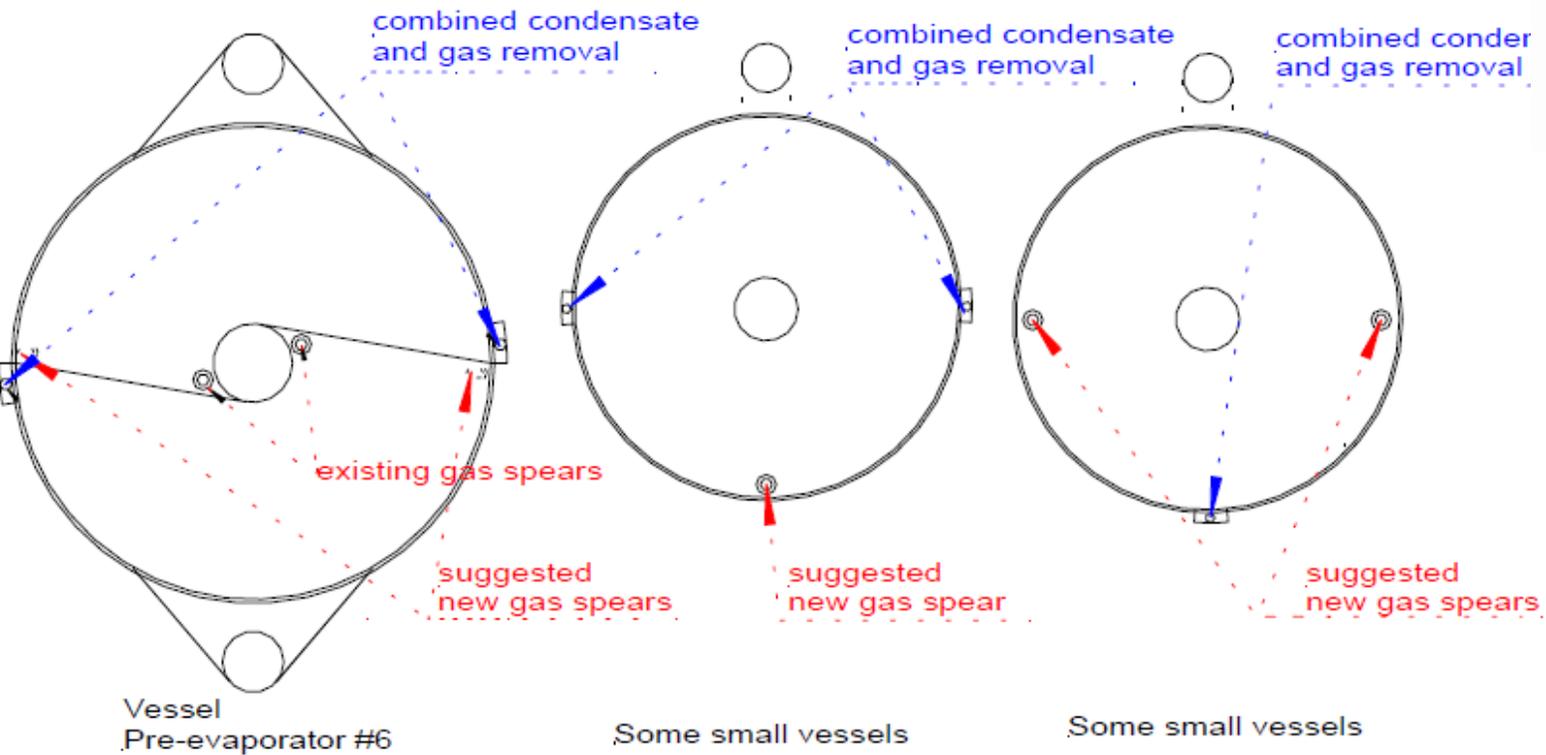
**Ar é mais pesado que o vapor**

**Pequena Degasagem Superior e Maior Inferior**

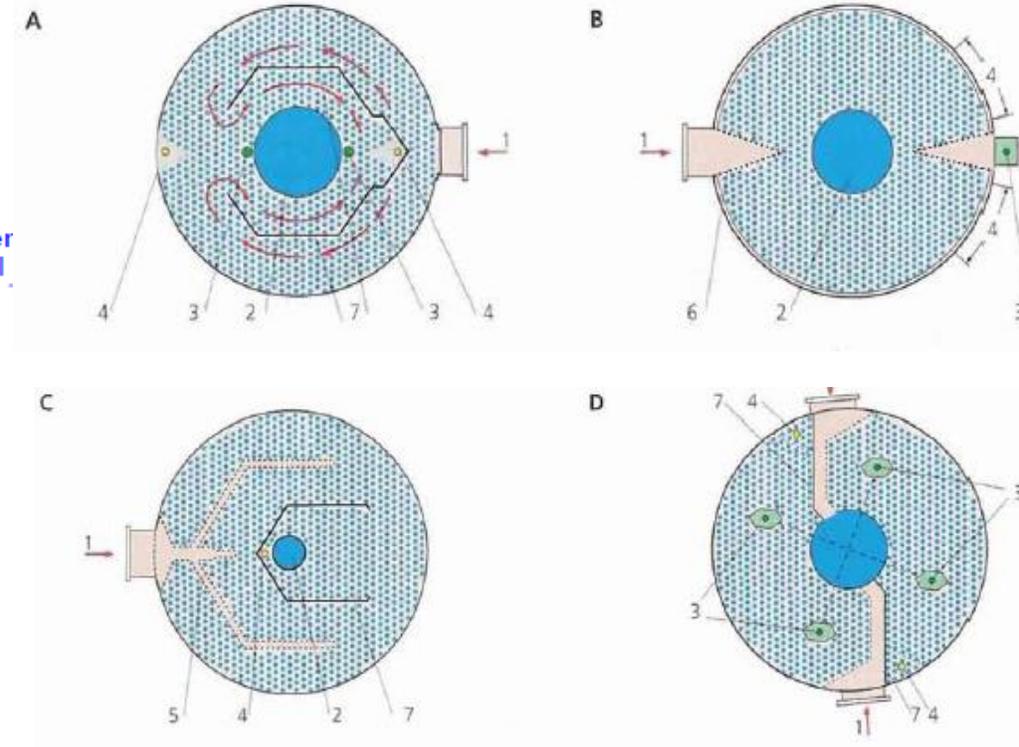
# Evaporação: Posicionamento das Degasagens



CALICHMAN



Fonte: Peter Wright



Fonte: Peter Rein. Handbook of Sugar Engineering

# Evaporação: Cuidados nas Degasagens



CALICHMAN



Acervo Pessoal

# Evaporação: Controle das Degasagens



CALICHMAN



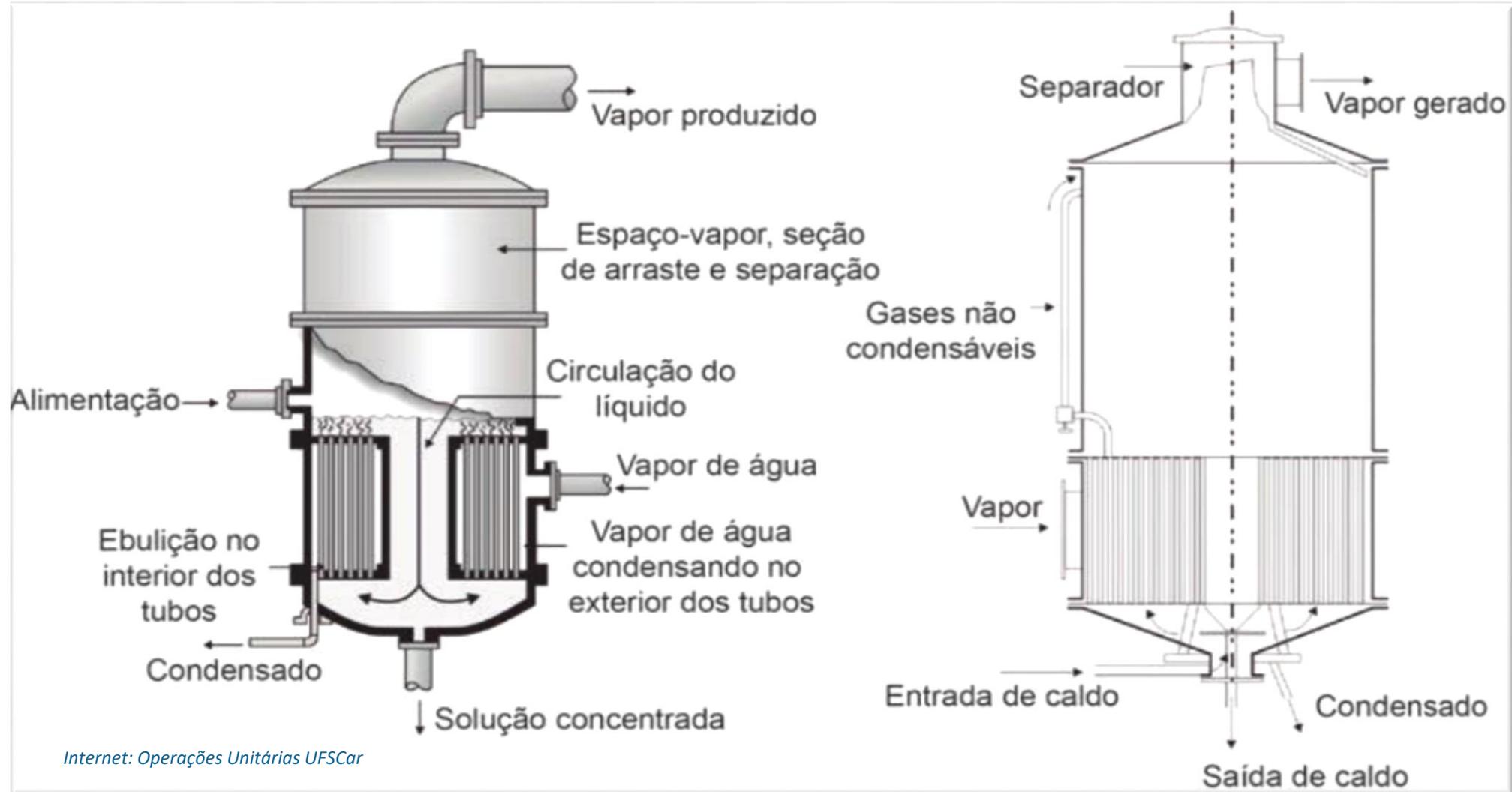
*Acervo Pessoal*



# Retiradas de Condensados também são Importantes!



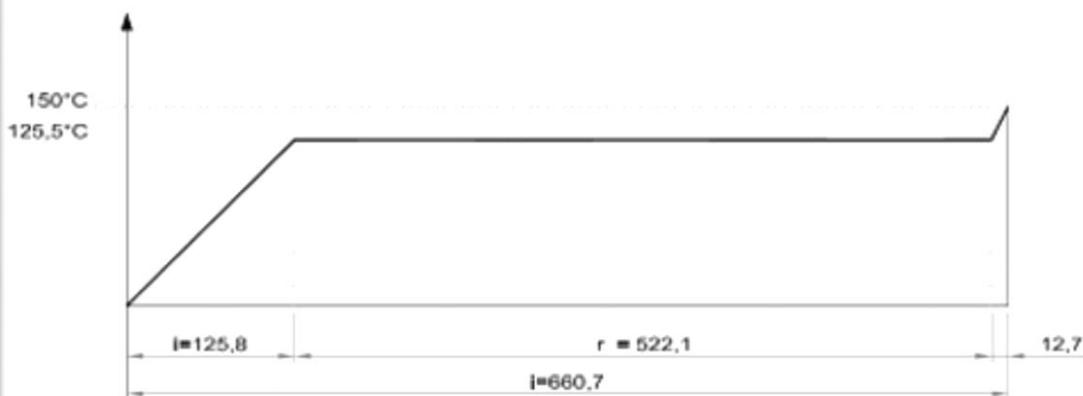
CALICHMAN



Internet: Operações Unitárias UFSCar

# Temperatura de Vapor Alimentado e nos Efeitos

Vapor Utilizado		Exemplo 1	Exemplo 2
		Saturado Seco	Vapor Superaquecido
Pressão	$p =$	2,4 ata	2,4 ata
Temperatura	$t =$	125,5°C	150°C
Calor Sensível	$i' =$	125,8 kcal/kg	125,8 kcal/kg
Calor Latente	$r =$	522,1 kcal/kg	534,9 kcal/kg
Calor Total	$i'' =$	648,0 kcal/kg	660,7 kcal/kg



- ❑ Hugot, Webre, Claasen sugerem um certo grau de superaquecimento.
- ❑ 30 @ 50 °C é admissível para V.E. (HUGOT)  
Sugestão: 10°C MÁX ou bem próximo à saturação nas às entradas de vapor dos Prés.
- ❑ Temperatura à entrada da Calandra.  
A depender da posição do dessuperaquecedor, o potencial de esfriamento do V.E. pode chegar a mais de 5°C
- ❑ E.P.E. por nível de caldo (Pressão Hidrostática e Brix/Pza dos caldos....  
Normograma de Othmer

# Tipos de Evaporadores: Falling Film

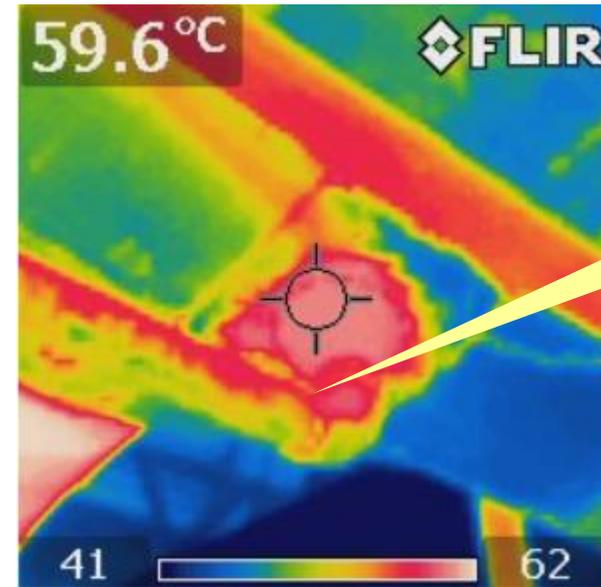


# Tipos de Evaporadores: Considerações Arrastes

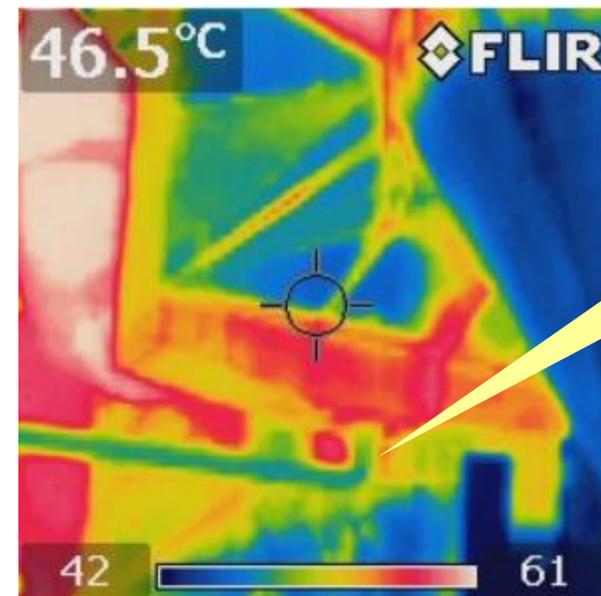


CALICHMAN

Recomenda-se além do  
balão de expansão, ter-se  
Separadores Centrífugos ou  
Vane



Retorno do Separador  
Operando (Quente)



Retorno do Separador  
Obstruído (Frio)

# Evaporadores: Considerações Arrastes



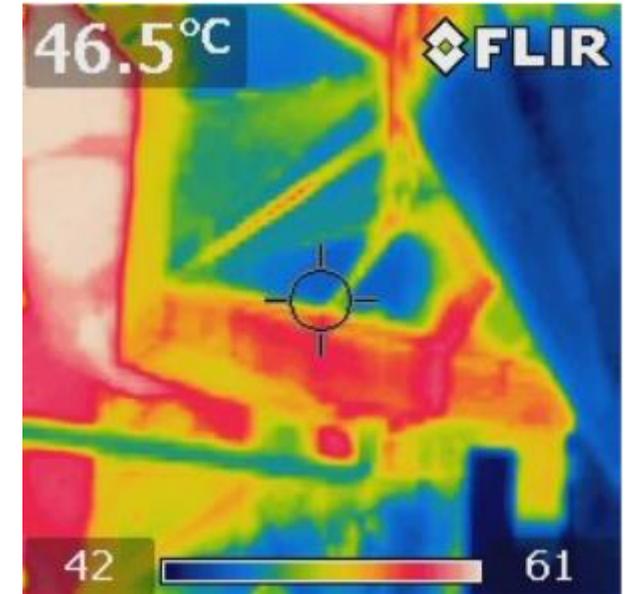
CALICHMAN



Fonte: Acervo Pessoal



Fonte: Acervo Pessoal



Fonte: Acervo Pessoal

# Evaporadores: Considerações Arrastes



CALICHMAN



Fonte: Acervo Pessoal



Fonte: Acervo Pessoal



Acervo Pessoal

- Vazão de Recirculação suficiente**
- Garantia de Perímetro Molhado nos tubos**
- Propiciar boa Distribuição de Caldo**
- Intertravamento de Segurança de Vazão Mínima X Admissão de V.E.**
- Garantir nível mínimo de caldo no balão inferior.  
Garrafa externa com radar/LT ou outro dispositivo.**
- Alguns modelos possuem Sistema para operação garantida de recirculação.**

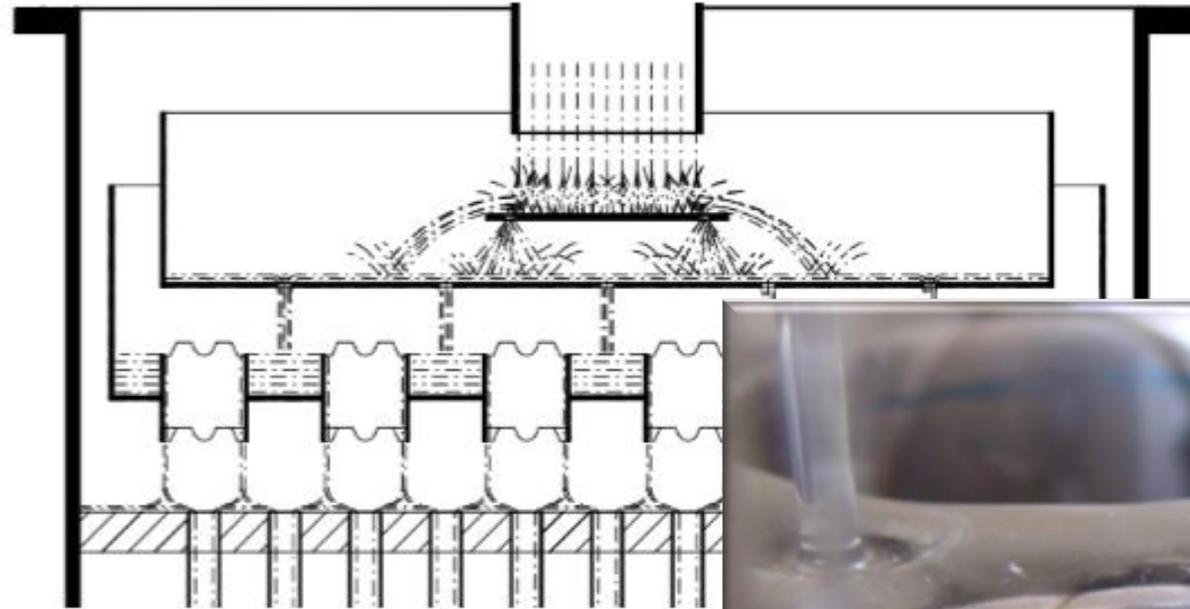
# Tipos de Evaporadores: Falling Film - Considerações



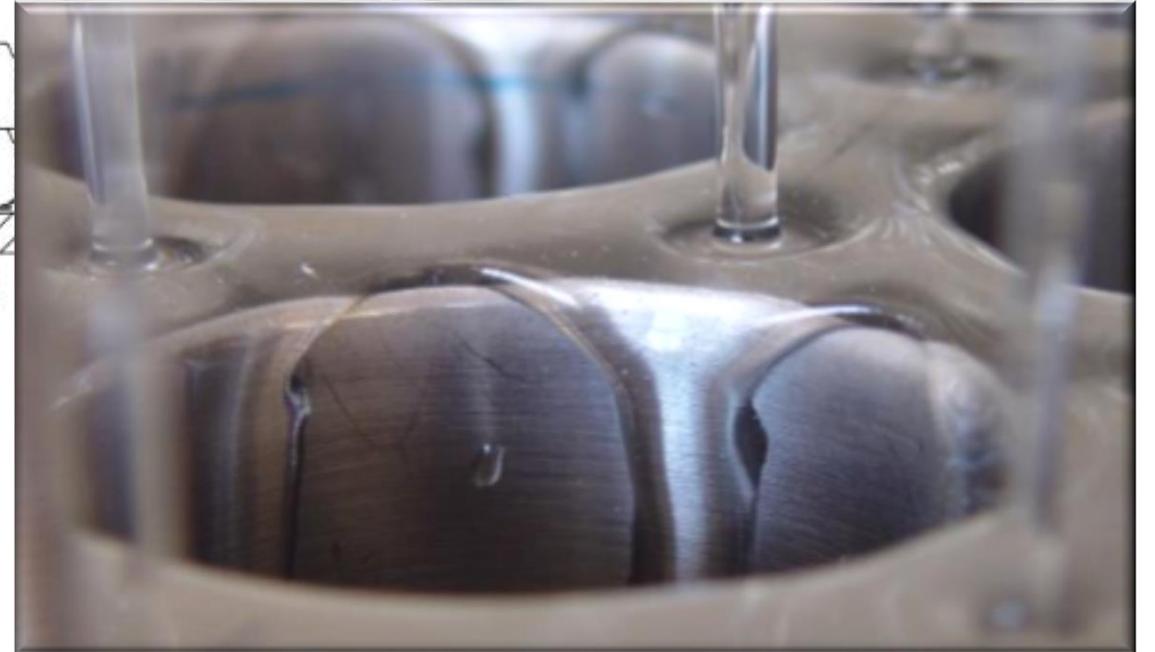
CALICHMAN



Acervo Pessoal



Fonte: Foxtermo – Alvaro Salla

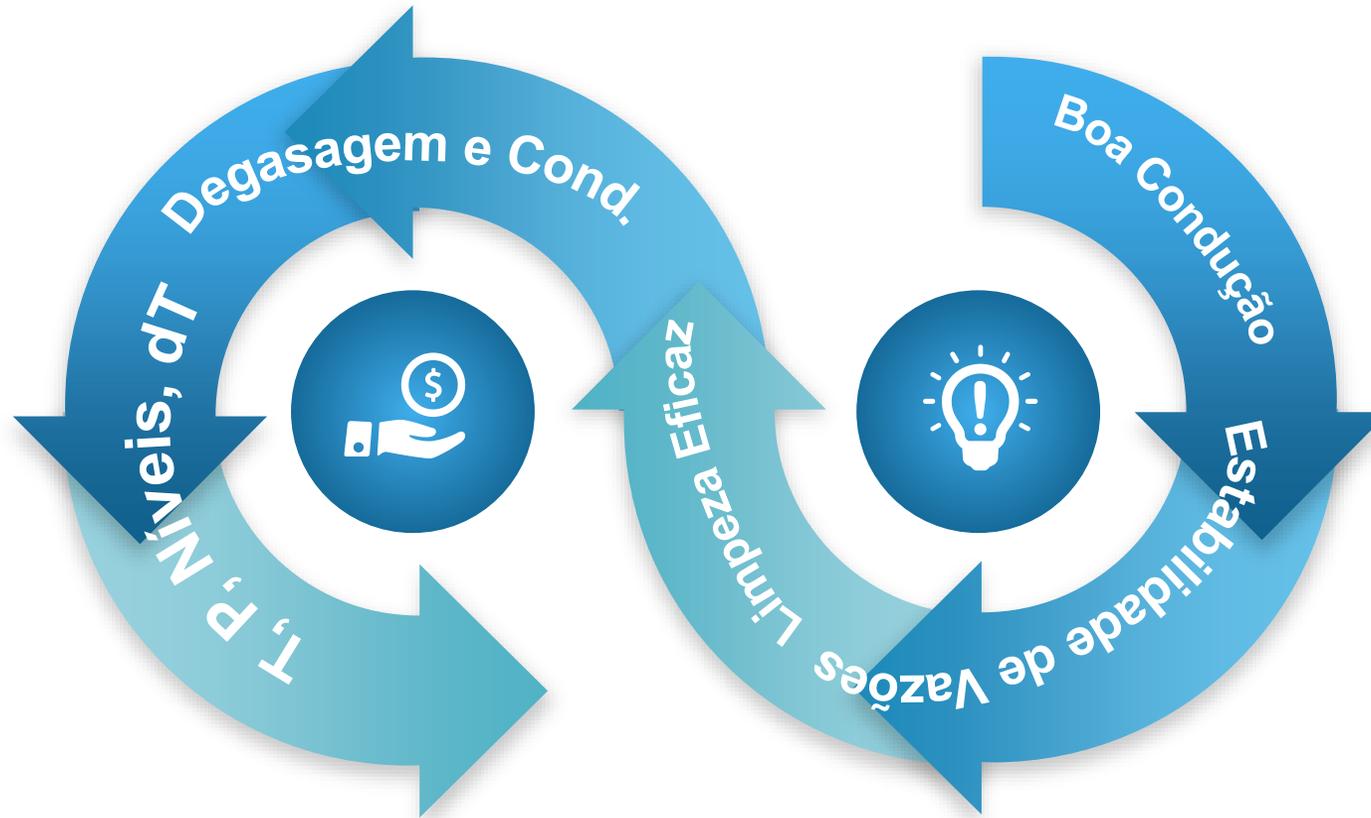


Fonte: Foxtermo – Alvaro Salla

# Evaporação de Caldo de Cana



CALICHMAN



Bons Resultados em Qualidade e Produtividade dependem de técnica e de Excelência Operacional!



Cuidados Necessário Nunca são demais...embasados em Técnicas e Boa Operação.



[eduardo@calichman.com](mailto:eduardo@calichman.com)

+55 (19) 99687 9461



Calichman Consultoria

# CALICHMAN

CONSULTORIA EM PROCESSOS E PROJETOS INDUSTRIAIS