



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE PRODUTIVIDADE DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO FLASH – MSF

Talita Mitsue Onose Araujo Cunha¹; Eduardo Manfredini Ferreira²

UFGD-FAEN, C. Postal 533, 79804-970, Dourados-MS.

¹ PIVIC CNPq/UFGD, e-mail: talitamitsue@yahoo.com.br

² Orientador: e-mail: EduardoManfredini@ufgd.edu.br

RESUMO

Tal projeto de iniciação tem como principal cunho o entendimento dos processos de dessalinização atualmente empregados no mundo, em especial os casos em que a dessalinização ocorre por via térmica, utilizando-se dos destiladores por múltiplos efeitos (MED), com principal enfoque nas características que possam estar envolvidas diretamente com o rendimento e produtividade destes destiladores. Aliado a estes destiladores, introduz-se o conceito de aproveitamento energético por cogeração, o qual é de fundamental importância nos dias atuais, podendo ser um dos principais geradores de energia para o aquecimento/pré-aquecimento da água a se passar pelos destiladores, quando do uso de processos de duplo propósito (objetivando geração térmica ou elétrica e água) ou híbridos (envolvendo mais de uma tecnologia de dessalinização).

Lista de símbolos

Md= vazão mássica do destilado (kg/s)

l_{bdv}= calor latente de condensação (kJ/kg)

M_f=vazão mássica de alimentação (kg/s)

C_p=calor específico a pressão constante (kJ/kg.K)

T_o= temperatura máxima da salmoura (°C)

T_n=temperatura do estágio (°C)

l_{bdv}=calor latente do vapor (kJ/kg)

LMTD_c= diferença logarítmica de temperatura de condensação (°C)

TTD_c= diferença de temperatura terminal do condensador (°C)

LMTDh= diferença logarítmica de temperatura de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)

TTDh=diferença de temperatura para o aquecedor de salmoura ($^{\circ}\text{C}$)

PR= razão entre a vazão mássica do destilado e a vazão mássica do vapor

deltaTst= queda de temperatura do estágio ($^{\circ}\text{C}$)

Ah= área de troca de calor para o condensador (m^2)

Ac= área de troca de calor para o aquecedor de salmoura (m^2)

sA= área total de transferência de calor ($(\text{m}^2/(\text{kg/s}))$)

n=número de estágios

Uc=coeficiente global de transferência de calor para o condensador ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

Uh=coeficiente global de transferência de calor para o aquecedor de salmoura ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

1- INTRODUÇÃO

A Terra possui abundância em água, mas 97% do seu total é água salgada, sendo que os 3% restantes ocupados pela água doce estão divididos em 2,1% nas geleiras e 0,9% entre rios lagos e lençóis subterrâneos. [Shiklomanov, I. A. & Rodda, 2004].

Dada a má distribuição da água doce no mundo, pesquisas são realizadas com o intuito de buscar tecnologias e métodos de dessalinização da água salgada, para suprir a demanda mundial de água em virtude do crescimento acelerado da mesma devido ao crescimento da população e desenvolvimento do setor industrial que necessita de água doce para determinados processos.

Para tal objetivo técnicas de obtenção de água potável vem sendo desenvolvidas e pesquisadas por meio de processos denominados dessalinização, o qual pode ser realizado por diversas tecnologias diferentes.

As tecnologias mais utilizadas nos últimos anos, conforme Ferreira (2008), se devem, principalmente, aos processos térmicos e por membranas.

No que tange os processos térmicos, os principais são a destilação multi estagiada por flasheamento (MSF- Multi Stage Flash), processo estudado no presente relatório, destilação por múltiplos efeitos (MED) e destilação por compressão de vapor (VC) (Ferreira, 2008).

Em relação aos processos que fazem uso de membrana de separação, tem-se a osmose reversa (RO), a nanofiltração (NF), a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF) e a eletrodialise/eletrodialise reversa (ED/EDR) (Ferreira, 2008).

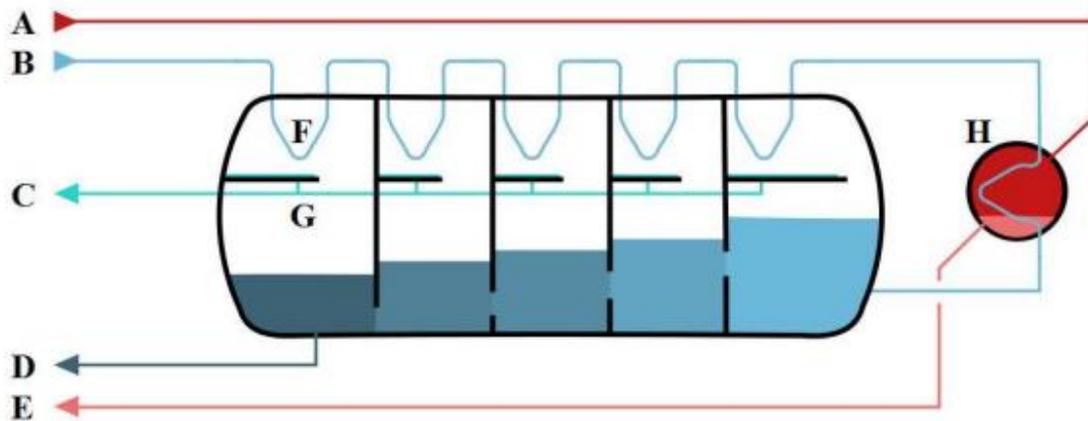
Há, ainda, outros processos que lançam mão de fontes alternativas de energia, para fornecimento de calor, podendo, por exemplo, ser utilizada a energia solar ou a energia nuclear.

2- Destilação Flash

O processo de destilação multi estagiada por flasheamento (MSF) consiste no flasheamento da água em vapor, em vários estágios, que essencialmente funcionam como trocadores de calor, devido a mudança de temperatura e pressão em cada estágio.

A água de alimentação é introduzida em um estágio inicial para pré-aquecimento, sendo pressurizada a uma temperatura limite, fluindo através dos tubos, realizando a troca de calor com o vapor de água proveniente de um aquecedor de salmoura. Ao ser aquecido, o líquido entrará em fracionamento (flash) em vapor, condensando na parte superior da câmara de flasheamento. Após o vapor ser condensado, é inserido nas bandejas de coleta, as mesmas passando por todos os estágios de destilação, com o intuito de retirar e coletar o destilado, que é a água doce produzida no processo de destilação (Ferreira, 2008). A Fig. 1 ilustra bem este processo.

Figura 1 - Esquematização de um processo de destilação MSF



Fonte: Pagaiame, Levi Miguel Teixeira, 2011

Por mais de 50 anos o processo MSF é usado nos países árabes devido a necessidade local de água potável, por restrições de sua disponibilidade (EL-NASHAR, 2001). Um dos países mais afetados pela carência de recursos hídricos renováveis é o Kuwait, sendo mais de 95% das necessidades de água potável supridas pela dessalinização (AZOURY, 2001).

3- MODELAGEM MATEMÁTICA

Como o objetivo proposto ao projeto é o da verificação das variáveis de decisão de uma planta de dessalinização MSF e seu grau de influência sobre os parâmetros da planta, por meio de modelagem matemática, tomou-se como base de referência o proposto por El-Dessouky, H.M. Ettouney (2002).

Segundo os autores, o processo de dessalinização multi estagiada por flasheamento é dividido em vários tipos, variando sua análise de acordo com seu arranjo e grau de complexidade, desde o caso mais simples até o mais complexo. Tais tipo são:

- a- *Single Stage Flashing* – Processo realizado em um único estágio, composto por equipamentos básicos, sendo um aquecedor de salmoura, câmara de flasheamento contendo tubos condensadores/pré-aquecedores, bandeja coletora entre outros.
- b- *Once Through MSF* – tal processo tem por objetivo vencer a maior desvantagem do processo *Single Stage Flashing*, que é melhorar a razão de desempenho do processo, sendo alcançado dividindo-se o processo em

um maior número de estágios. Tal processo será o objeto de estudo do presente trabalho.

- c- *Brine Mixing MSF* – possui recirculação da salmoura, com o intuito de diminuir a vazão mássica de água do mar de alimentação e assim diminuir a razão de consumo de aditivos químicos e diminuir as seções de pré-tratamento para a água de alimentação.
- d- *MSF with Brine Recirculation and a Heat Rejection Section* – tal processo apresenta seção de rejeição de calor adicionado, removendo o excesso de calor adicionado no sistema no aquecedor de salmoura, diminuindo o pré-tratamento da água de alimentação, como também tendo pré-tratamento do vapor de alimentação menor que no processo *Once Through*.
- e- *Conventional MSF* – a análise é feita considerando uma seção de rejeição de calor de três estágios e uma seção de recuperação de calor de vinte estágios.

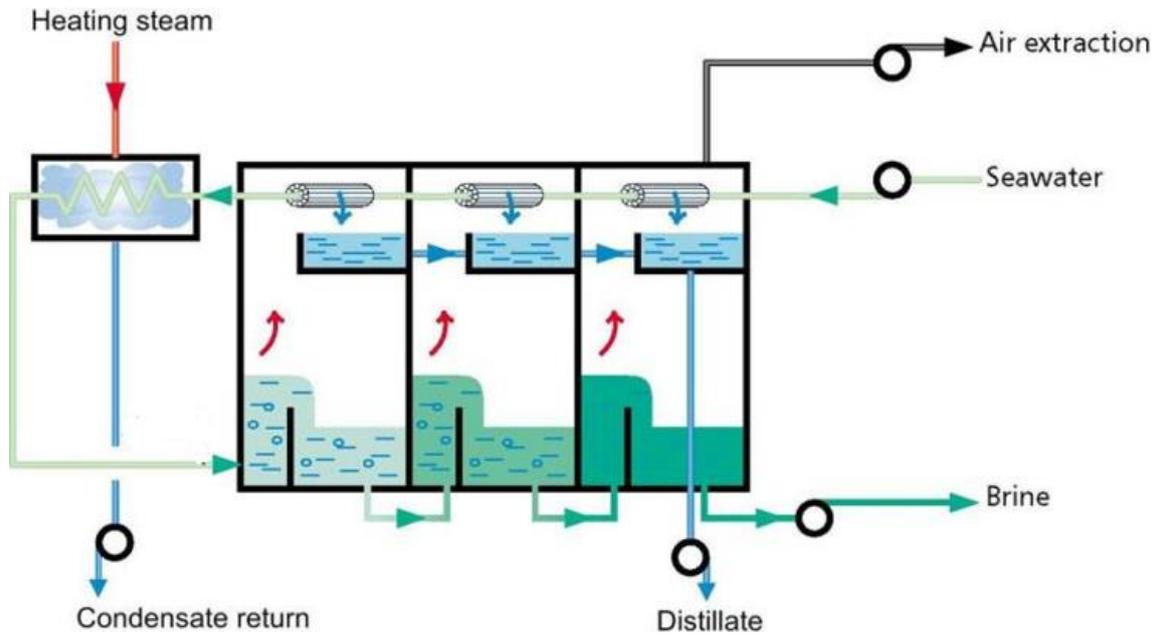
Visando satisfazer as condições estabelecidas para o projeto e de maneira a simplificar a modelagem para análise de variáveis, o processo MSF escolhido foi o *Once Trough MSF*. Devido ao seu arranjo, seu estudo passa a ficar mais simplificado, contudo não deixa de levar em consideração variáveis de decisão importantes para um processo real de dessalinização, como o número de estágios contidos no processo, por exemplo. Tal processo é ilustrado na Fig. 2.

A modelagem estabelecida para o estudo proposto é descrita por meio das equações apresentadas a seguir.

A Eq. 1 representa a vazão mássica de destilado em função da vazão de alimentação multiplicada pelo calor específico e queda de temperatura do estágio, divididos pelo calor latente de condensação.

$$M_d = M_f * C_p * (T_o - T_n) / l_{b d b v} \quad \text{Eq. 1}$$

Figura 2 – Esquematização de um processo *Once Trough*.



Fonte: Sidem-Desalination (2014).

A Eq. 2 representa a queda de temperatura do estágio em função da temperatura limite de salmoura, temperatura do estágio e número de estágio.

$$\Delta T_{st} = (T_o - T_n)/n \quad \text{Eq. 2}$$

A Eq. 3 representa a razão entre a vazão mássica do destilado e a vazão mássica do vapor em função do número de estágios, queda de temperatura do estágio, calor latente do vapor, perdas termodinâmicas, diferença de temperatura terminal do condensador e calor latente de condensação.

$$PR = (n * \Delta T_{st} * l_{bds}) / ((\Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + TTDc) * l_{dbv}) \quad \text{Eq. 3}$$

A Eq. 4 representa a razão de fluxo de alimentação específico em função do calor latente de condensação, calor específico a pressão constante e a queda de temperatura do estágio.

$$M_f/M_d = l_{dbv} / (C_p * (T_o - T_n)) \quad \text{Eq. 4}$$

A Eq. 5 representa a vazão mássica da salmoura em função da vazão mássica de alimentação e a vazão mássica do destilado.

$$M_b = M_f - M_d \quad \text{Eq. 5}$$

A Eq. 6 representa a salinidade da salmoura em função da salinidade de alimentação e vazão mássica da salmoura.

$$X_b = X_f * M_f / M_b \quad \text{Eq. 6}$$

A Eq. 7 representa a diferença logarítmica de temperatura para o condensador em função da queda de temperatura do estágio e diferença de temperatura terminal para o condensador.

$$(\Delta T_{st} + TTD_c) / TTD_c = EXP(\Delta T_{st} / LMTD_c) \quad \text{Eq. 7}$$

A Eq. 8 representa a diferença logarítmica de temperatura para o aquecedor de salmoura em função da queda de temperatura do estágio, diferença de temperatura terminal para o aquecedor de salmoura, diferença de temperatura terminal para o condensador e perdas termodinâmicas.

$$(TTD_h + \Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + TTD_c) / TTD_h = EXP((\Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + TTD_c) / LMTD_h) \quad \text{Eq. 8}$$

A Eq. 9 representa a área de troca de calor para o condensador em função da vazão mássica do destilado, vazão mássica do vapor, calor latente do vapor, coeficiente global de transferência de calor para o condensador e diferença logarítmica de temperatura para o condensador.

$$A_c = M_d * (M_f * C_p * \Delta T_{st}) / (U_c * LMTD_c) \quad \text{Eq. 9}$$

A Eq. 10 representa a área de troca de calor para o aquecedor de salmoura em função da vazão mássica do destilado, vazão mássica de alimentação, queda de temperatura do estágio, coeficiente global de transferência de calor para o aquecedor de salmoura e diferença logarítmica de temperatura.

$$A_h = M_d * (M_s * l_{bds}) / (M_d * U_h * LMTD_h) \quad \text{Eq. 9}$$

A Eq. 11 representa a área total de transferência de calor em função da área de troca de calor para o aquecedor de salmoura, vazão mássica do destilado, número de estágios e a área de troca de calor para o condensador

$$sA = Ah/Md + n * (Ac/Md) \quad \text{Eq. 11}$$

Primeiramente admitiu-se todos os valores adotados pela literatura em análise (El-Dessouky, H.M. Ettouney, 2002), para verificar a concordância com os resultados demonstrados, sendo confirmados. Os parâmetros iniciais para estes cálculos, de acordo com a literatura de referência, são os apresentados na Tab. 1

A modelagem foi dividida em casos, sendo analisada uma variável de interesse e seus impactos nas demais que fossem pertinentes ou tivessem variações significativas.

Tabela 1 – Parâmetros iniciais.

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
N	23	TTDh	10
Lbdbv	2346,5	TTDc	3
Lbds	2256	deltaTloss	2
To	90	Cp	4,18
Tn	40	Mf	11,22
Uc	2	Xf	42000
Uh	2		

Fonte: El-Dessouky, H.M. Ettouney (2002)

- 3.1- Caso 1 – variação do número de estágios da unidade, sendo adotada a faixa entre 20 a 40 estágios, com passo 4.
- 3.2- Caso 2 – variação da temperatura limite de salmoura, sendo adotada a faixa entre 90 a 120 °C, com passo 5.
- 3.3- Caso 3 – variação da vazão mássica de alimentação, sendo adotada a faixa entre 10 a 25 kg/s, com passo 5.

4- RESULTADOS

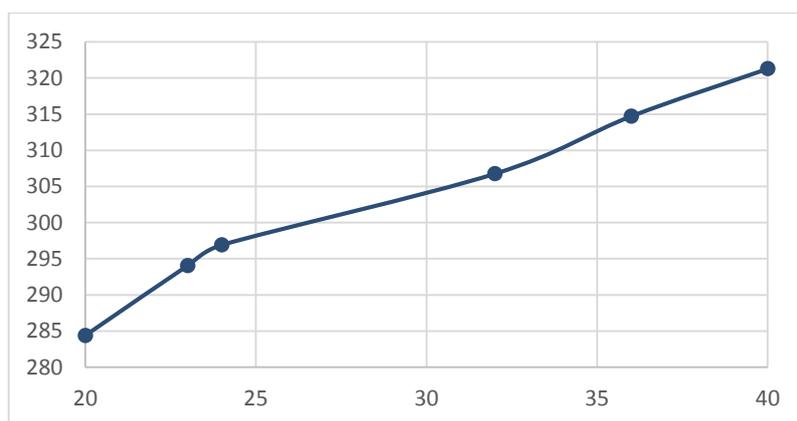
Após os cálculos efetuados, foram obtidos os valores apresentados na Tab. 2, relativos ao caso 1. Pode-se perceber que a área de troca de calor para o condensador (A_c) varia inversamente ao aumento do número de estágios, ao passo que a razão entre a vazão mássica do destilado e a vazão mássica do vapor (PR) e a área total de transferência de calor (sA) aumentam diretamente. As fig. 3, 4 e 5 ilustram de uma melhor forma estas variações.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos para o caso 1.

N	PR	A_c	sA
20	6,4095	14,2046	284,3837
23	6,7009	12,7723	294,0608
24	6,7866	12,3584	296,9008
32	7,0842	10,9445	306,7535
36	7,3252	9,8252	314,7177
40	7,5242	8,9160	321,2936

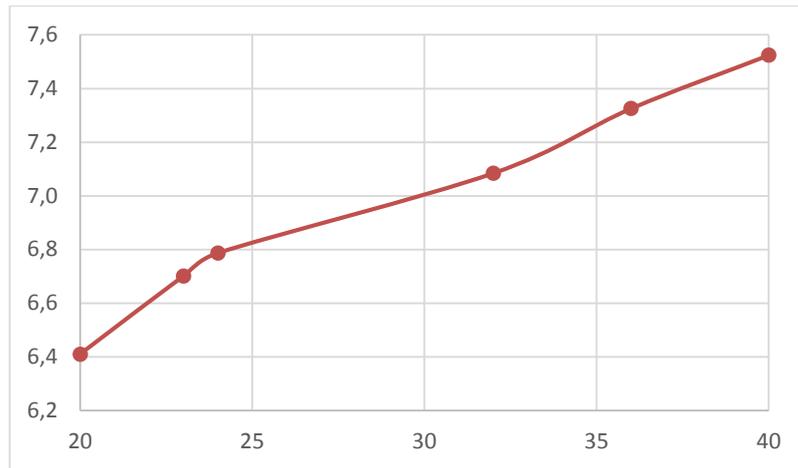
Fonte: elaborada pelo Autor

Figura 3 – Área total para troca de calor versus o número de estágios.



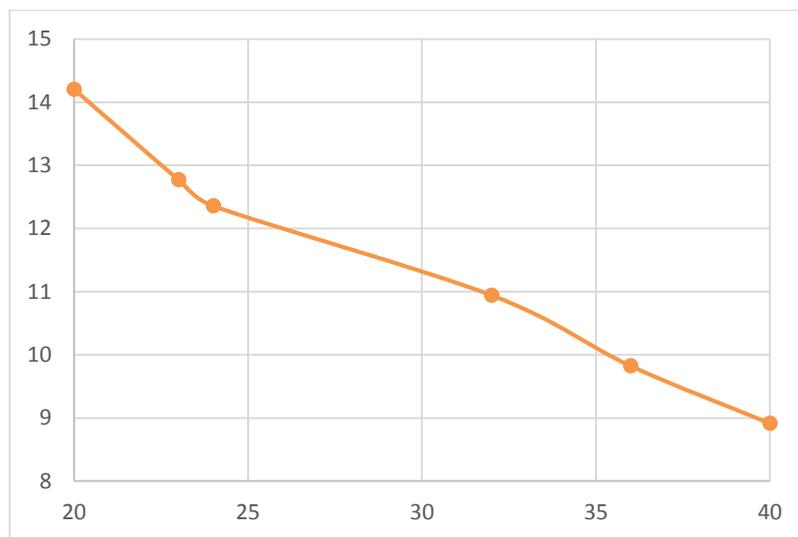
Fonte: do Autor

Figura 4 – Razão entre a vazão mássica do destilado e a vazão mássica do vapor (PR) versus o número de estágios.



Fonte: do Autor

Figura 5 – Área de troca de calor para condensador versus o número de estágios



Fonte: do Autor

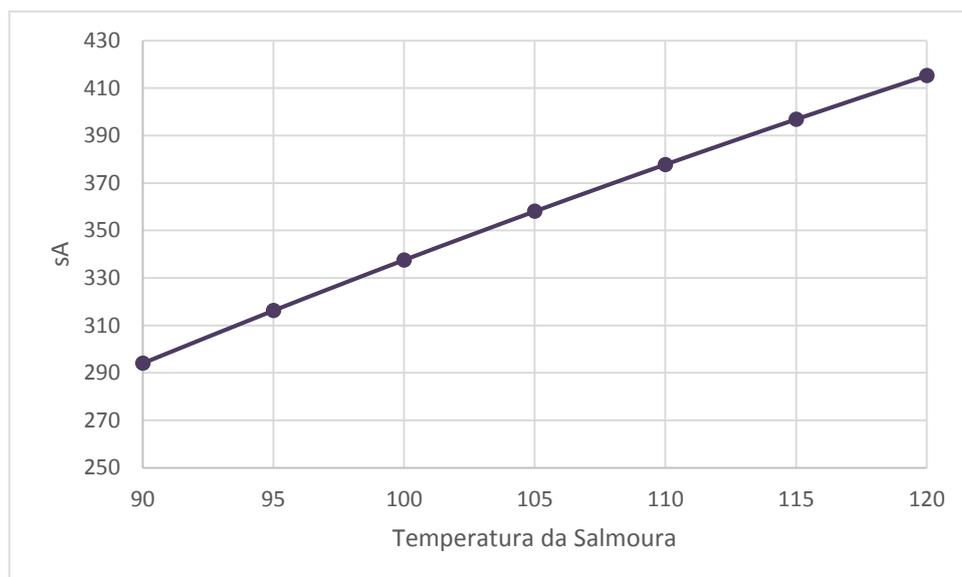
A Tab. 3 mostra os resultados obtidos para o caso 2, cujos parâmetros de interesse trabalhados foram a razão entre a vazão mássica do destilado e a vazão mássica do vapor (PR), a salinidade da salmoura (X_b), a área do condensador (A_c) e a área total de troca de calor (sA). As fig. 6, 7 e 8 ilustram os comportamentos destas variáveis em relação a temperatura máxima da salmoura.

Tabela 3 – Parâmetros obtidos para o caso 2.

To	PR	Xb	Ac	sA
90	6,700889	46106,67	12,77226	294,0608
95	7,154185	46561,94	15,11046	316,2494
100	7,581577	47026,29	17,59581	337,5615
105	7,985226	47500,00	20,22063	358,0645
110	8,367056	47983,35	22,97797	377,8170
115	8,728790	48476,64	25,86150	396,8720
120	9,071973	48980,17	28,86543	415,2770

Fonte: Elaborada pelo Autor

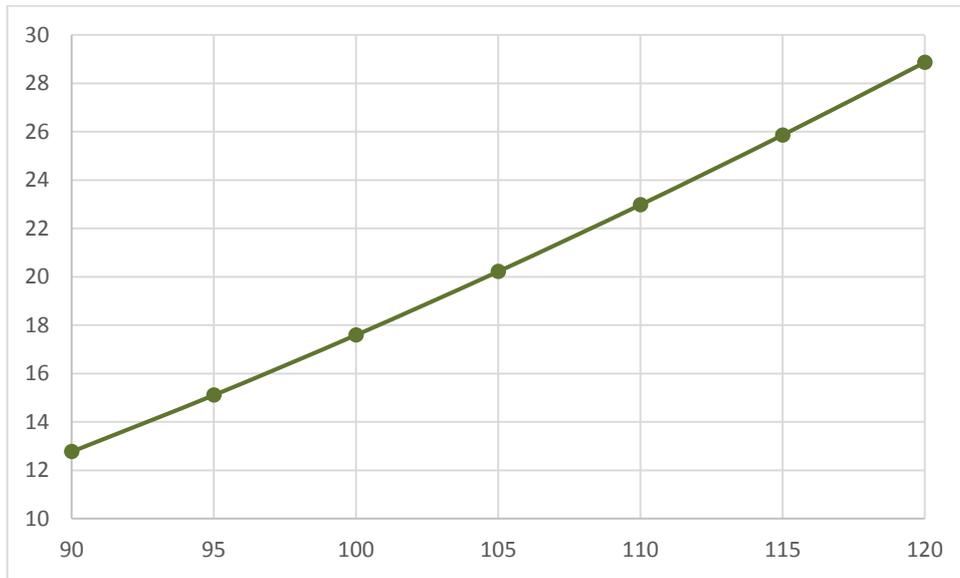
Figura 6 – Área total de troca de calor (sA) versus temperatura máxima da salmoura (To).



Fonte: do Autor

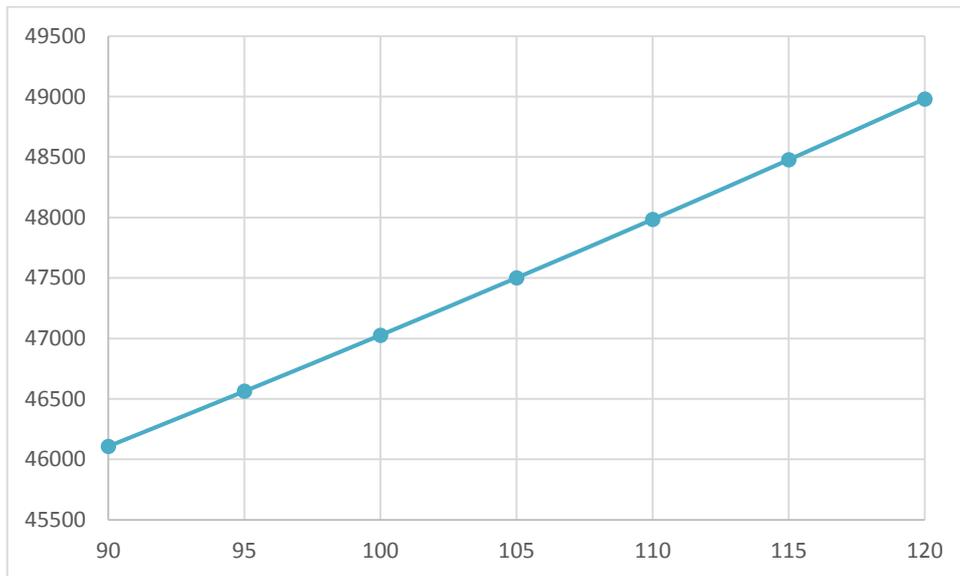
A Fig. 9 mostra duas relações, envolvendo a razão entre a vazão mássica do destilado e a vazão mássica do vapor (PR) e a concentração de salmoura convergindo a um máximo para PR e para aumento da salinidade no rejeito a medida em que se eleva a temperatura. Contudo, deve-se atentar a riscos inerentes da elevação de temperatura de salmouras, os quais podem aumentar a possibilidade de corrosão nos equipamentos.

Figura 7 – Área de troca de calor para o condensador versus temperatura máxima da salmoura.



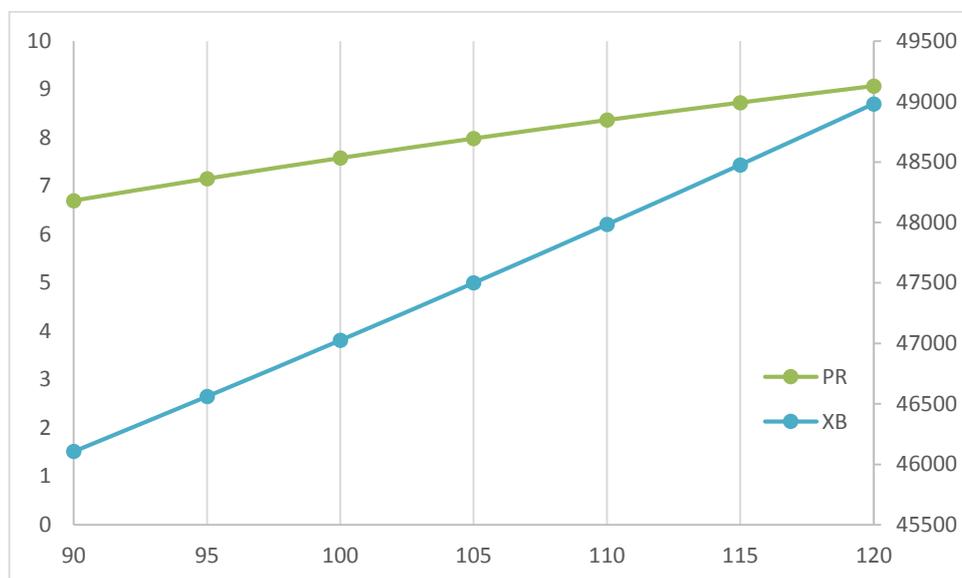
Fonte: do Autor

Figura 8 – Salinidade da salmoura versus temperatura máxima da salmoura.



Fonte :do Autor

Figura 9 – Razão entre a vazão mássica do destilado e a a vazão mássica do vapor (PR) e Salinidade da salmoura versus a temperatura máxima da salmoura.



Fonte :do Autor

Para o caso 3, por meio da Tab. 4, nota-se que em relação ao aumento da vazão mássica de alimentação (M_f), a vazão mássica do destilado (M_d), a vazão mássica da salmoura (M_b), a Área de troca de calor para o condensador (A_c) e a área total de troca de calor (sA) aumentam de forma diretamente proporcional, com destaque para o aumento na área de total de troca de calor e na área de troca de calor para o condensador.

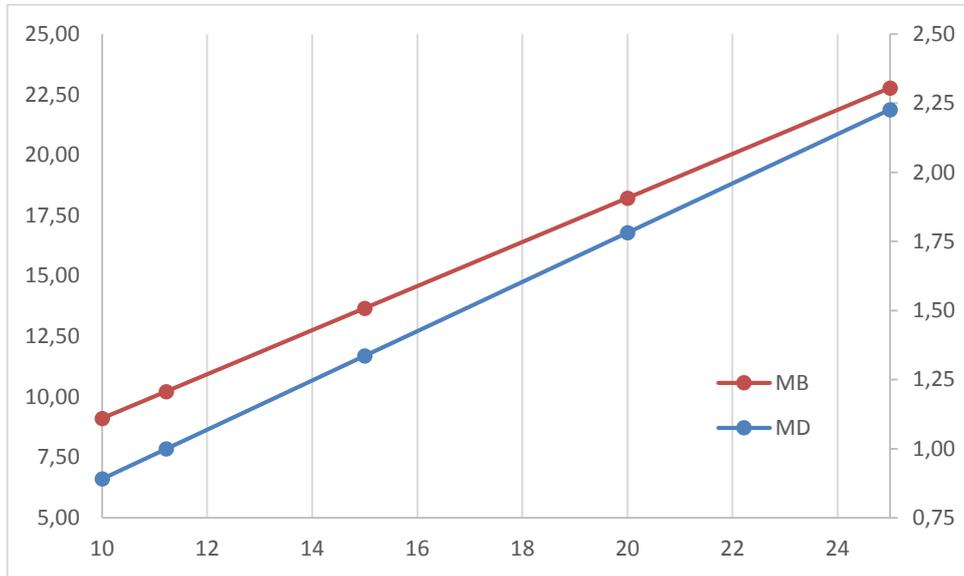
As Fig. 10 e 11, demonstram crescimento das variáveis em relação a vazão mássica de alimentação, sendo da vazão do destilado e vazão da salmoura e área de troca de calor para o condensador e área total de troca de calor respectivamente.

Tabela 4 – Parâmetros obtidos para o caso 3.

M_f	M_d	M_b	A_c	sA
10,00	0,89069	9,10931	10,14570	262,11130
11,22	0,99935	10,22065	12,77226	294,06081
15,00	1,33603	13,66397	22,82783	393,06559
20,00	1,78138	18,21862	40,58280	524,04015
25,00	2,22672	22,77328	63,41063	655,02282

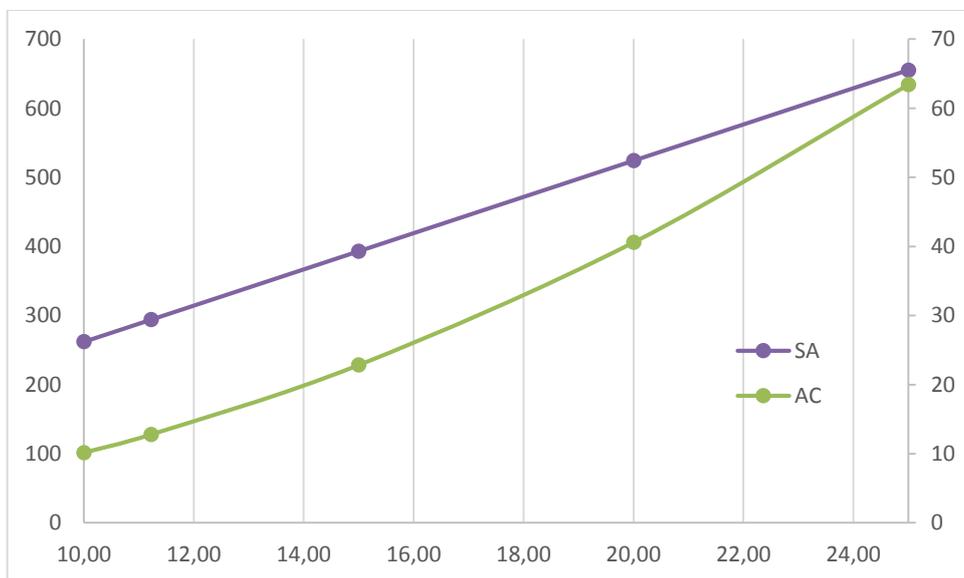
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10 – Vazão mássica do destilado e vazão mássica da salmoura versus vazão mássica de alimentação.



Fonte: do Autor

Figura 11 – Área de troca de calor para o condensador e área total de troca de calor versus vazão mássica de alimentação.



Fonte: do Autor

5- CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a análise de parâmetros de interesse ao processo de destilação flash e sua influência nas demais variáveis que regem o processo de destilação. Entretanto, devido aos diferentes aspectos que a análise de uma unidade MSF podem assumir, simplificações foram necessárias para que os cálculos fossem realizados. Uma delas diz respeito a tecnologia empregada, sendo assumido o modelo *Once Through MSF*.

Posto o equacionamento, a análise seguinte refere-se aos tipos de variáveis que serão estudadas e que sofrerão variações. Assim, chega-se a situação em que o número de estágios (n), a temperatura limite da salmoura (T_o) e a vazão mássica de alimentação (m_f) serão variadas dentro de uma faixa de valores e analisados os impactos que as demais variáveis do equacionamento, como um todo, podem sofrer.

Embora haja diversas equações e variáveis, apenas algumas apresentaram variações mais significativas.

Para o caso 1, ao se variar o número de estágios, embora o Pr sofra um ligeiro acréscimo ao se aumentar o número de estágios, as maiores variações ficam por conta das áreas do condensador e total. É interessante observar que, como a vazão de alimentação foi mantida constante, é necessário um maior número de estágios para se executar esta vazão e, em consequência, a área de condensação tende a ser menor, pois a parcela de condensação por estágio torna-se menor. Deste modo, infere-se que área total de troca de calor tende a aumentar, o que foi confirmado pelos cálculos.

Para o caso 2, ao se variar a temperatura máxima da salmoura, nota-se uma maior faixa de variação na razão de desempenho, o que é de se esperar, pois a produção de destilado aumenta na faixa de 60% (de aproximadamente 1 kg/s para 90 °C à 1,598 kg/s para 120 °C). Em consequência, a concentração de sal na salmoura tende a aumentar a as áreas, tanto do condensador quanto da área total de troca de calor.

Para o caso 3, ao se variar a vazão de alimentação percebe-se sua influência direta na vazão da salmoura e nas áreas de troca térmica, tanto do condensador quanto na área total de troca de calor, consequência de uma maior passagem de água pelo destilador.

REFERÊNCIAS

CADT, Committee on Advancing Desalination Technology, National Research Council, “Desalination: A National Perspective”, National Academies Press, 2008.

EL-DESSOUKY, H. T.; ETTOUNEY, H. M. Preface. In: H. T. El-Dessouky; H. M. Ettouney (Orgs.); **Fundamentals of Salt Water Desalination**. p.VII–X, 2002. Amsterdam: Elsevier Science B.V. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444508102500014>. Acesso em: 22/8/2014.

IDA, **Journal of Dessalinization and Water Use**, 2011, International Dessalinization Association.

PAGAIME, MIGUEL L. **Dimensionar uma instalação de dessalinização de água por destilação a baixa temperatura**. Instituto superior técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

SHIKLOMANOV, I. A. & Rodda, J. C., “**World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century (International Hydrology Series)**”, Cambridge University Press, 2004.

Shoaiba Desalination Plant. Wat Technology. Retrieved 2006-11-13.

SIDEM-DESALINATION, MSF. Disponível em: <http://www.sidem-desalination.com/en/Process/MSF/>. Acesso em: 21 de ago.2014.

TENNILLE WINTER, D.J. Pannell, and Laura McCann (01-02). **The economics of desalination and its potential application in Australia**, SEA Working Paper 01/02.

University of Western Australia, Perth. Retrieved 2006-11-13.

