

MODELAGEM DE UM EJETOR PARA UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE VÁCUO

Jéssica de Paula Reis (IC) e Míriam Tvrzská de Gouvêa (Orientadora)

Apoio PIBIC Mackenzie

RESUMO

Visando à compreensão e simulação do funcionamento de ejetores a vapor, elaborou-se um modelo unidimensional baseado no modelo originalmente proposto por Keenan (1950) na forma de problemas de otimização. Ejetores a vapor trabalham com dois fluidos, denominados primário e secundário, os quais atravessam diferentes seções formadas para que o ejetor funcione segundo o princípio de um Venturi. O modelo usado no trabalho assume que quando os fluidos primário e secundário são misturados e levados para a garganta do ejetor, a pressão permanece constante. A partir dos dados fornecidos no artigo de El-Dessouky et al. (2002), o qual compilou resultados de oito diferentes referências, tornou-se possível a avaliação da modelagem proposta. A partir do modelo de Keenan (1950) foram propostas três abordagens de modelagem, programadas no simulador MATLAB, sendo os resultados simulados tabelados e interpretados. O trabalho possibilitou a compreensão do sistema como um todo, além de mostrar a sensibilidade do modelo às temperaturas dos fluidos de trabalho.

PALAVRAS CHAVES: Ejetor a vapor; avaliação; modelagem

ABSTRATC

In order to comprehend and simulate a steam ejector, a unidimensional model based on the model originally proposed by Keenan (1950) was elaborated and formulated as optimization problems. Steam ejectors work with two fluids, the primary and secondary fluids, traversing different sections formed so that the ejector operates accordingly to the Venturi effect. The model assumes that when the primary and secondary fluids are mixed and brought to the ejector, pressure remains constant in the mixing chamber. The results presented in El-Dessouky et al. (2002), who compiled the results of 8 different references, were used to evaluate the modeling approach. Based on the model of Keenan (1950), 3 different optimization models were proposed and solved in MATLAB. The simulation results were tabulated and interpreted. The work enabled the comprehension of the ejector system and permitted to perform some sensitivity analysis to variations of process temperatures.

KEYWORDS: Ejector system; evaluation; modeling

INTRODUÇÃO

O ejetor a vapor, esquematizado na figura 1, é um dispositivo que utiliza a queda de pressão devido ao efeito Venturi. O ejetor opera com dois fluidos, os quais, após a mistura, são arrastados à garganta do ejetor numa corrente de alta velocidade devido à diminuição da área de escoamento, ocasionando a diminuição de pressão. A mistura escoam com velocidade próxima à do som, alcançando a menor pressão durante a passagem pela garganta, contudo a pressão da operação só é atingida no difusor através do processo subsequente de compressão no difusor após a garganta.

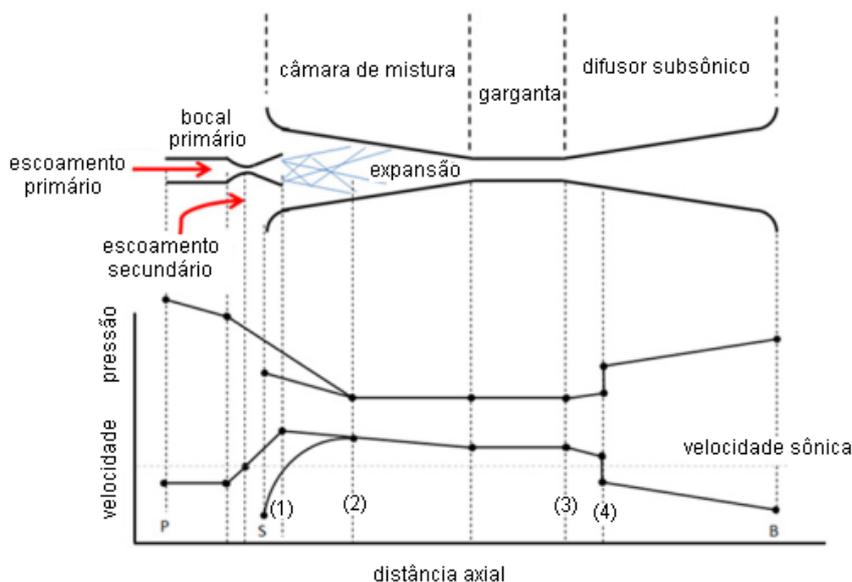


Figura 1: Geometria típica de um ejetor com os perfis de velocidade e pressão na direção axial (adaptado de Pound et al., 2013)

No ejetor de vapor ocorre a condução e expansão do vapor na câmara de mistura, onde os fluidos são aspirados para a garganta e direcionados para o difusor. Através do bocal primário supersônico, o fluido primário é inserido em alta pressão. Dentro do bocal ocorre sua expansão para que a pressão na entrada da garganta seja baixa. O fluido secundário é arrastado pelo fluido primário para a câmara de mistura; no fim da câmara, a mistura atinge velocidade supersônica. Na garganta, as ondas de choque formam um efeito de compressão; com isso a velocidade é reduzida a valores subsônicos. Porém, a compressão adicional do fluido é adquirida quando a mistura flui pela seção do difusor subsônico.

A modelagem do sistema desenvolvida neste trabalho é baseada na teoria de escoamento compressível unidimensional, sendo aplicada para gases ideais, usando

equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Assume-se ainda pressão constante na câmara de mistura e no difusor e que o processo seja adiabático. A modelagem proposta neste trabalho foi estruturada em três diferentes problemas de otimização, resolvidos pelo simulador MATLAB e teve como objetivos validar os dados retirados das referências e caracterizar a sensibilidade do ejetor a vapor.

REFERENCIAL TEÓRICO

A modelagem inicial proposta por Keenan (1950) é desenvolvida neste trabalho como um problema de otimização resolvido por um algoritmo SQP, sendo necessário o fornecimento de estimativa inicial. Dessa forma, a abordagem deste trabalho difere dos esquemas de modelagem da literatura, pois, elimina-se a necessidade de reestimativa da pressão na seção 1, como pode ser observado, por exemplo, no esquema de solução do modelo de Keenan (1950) proposto na literatura para o caso de projeto apresentado a seguir.

1. Defina os parâmetros de entrada: razão entre as vazões dos fluidos primário e secundário, temperaturas dos fluidos primário e secundário, rendimentos.
2. Estime um valor para a pressão na seção 1.
3. Calcule os números de Mach dos fluidos primário e secundário antes da mistura e nas seções 3 e 4.
4. Calcule as pressões nas seções 4 e de saída.
5. Se a pressão na saída calculada for próxima ao valor especificado para o projeto, as áreas podem ser calculadas, senão, deve-se voltar ao passo 2.

As equações que representam a fenomenologia de operação de ejetores a vapor, tais quais propostas por Keenan (1950) são apresentado a seguir:

$$P_4 = P_1 * \frac{1 + k * M_3^2}{1 + k * M_4^2} \quad (1)$$

$$P_B = P_4 * \left[\frac{\eta_d * (k - 1)}{2} * M_4^2 + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

Sendo a pressão de saída P_B , P_4 a pressão na seção 4, η_d o rendimento no difusor, M_3 , M_4 e k , calculados como:

$$M_3 = \sqrt{\frac{2 * (M_3^*)^2}{k + 1 - (k - 1) * (M^*)^2}} \quad (3)$$

$$M_3^* = \frac{M_{1'}^* + w * M_{1''}^* \sqrt{\frac{T_s}{T_p}}}{\sqrt{(1 + w) * \left(1 + w * \frac{T_s}{T_p}\right)}} \quad (4)$$

Sendo, w a razão entre as vazões mássicas do fluido secundário sobre o primário, T_s e T_p , as temperaturas dos fluidos secundário e primário, $M_{1'}^*$ e $M_{1''}^*$ dados pelas equações (5) e (6).

$$M_{1'}^* = \sqrt{\frac{(k + 1) * M_{1'}^2}{2 + (k - 1) * M_{1'}^2}} \quad (5)$$

Sendo, $M_{1''}^*$ dado por (6).

$$M_{1''}^* = \sqrt{\frac{(k + 1) * M_{1''}^2}{2 + (k - 1) * M_{1''}^2}} \quad (6)$$

Sendo, $M_{1'}$ dado por (7).

$$M_{1'} = \sqrt{\frac{2 \eta_n}{(k - 1)} * \left[\left(\frac{P_p}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (7)$$

Sendo, η_n a eficiência do bocal, P_p a pressão do fluido primário, assumida como sendo a pressão de saturação na temperatura T_p .

$$M_{1''} = \sqrt{\frac{2}{(k - 1)} * \left[\left(\frac{P_s}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (8)$$

Sendo, P_s a pressão do fluido secundária, assumida como sendo a pressão de saturação na temperatura T_s .

$$M_4 = \frac{\sqrt{\frac{M_3^2 + \frac{2}{k-1}}{\frac{2k}{k-1} * M_3^2 - 1}}}{\sqrt{k-1} * M_3^2 - 1} \quad (9)$$

$$k = \frac{1}{1 - \frac{R}{cp}} \quad (10)$$

Sendo, R a constante do gás considerado e cp a capacidade calorífica dos fluidos primário e secundário, assumidos idênticos e com propriedades constantes.

O cálculo das áreas pode ser feito a partir das equações (11) a (12).

$$A_t = \frac{\dot{m}_p}{P_p} * \sqrt{\frac{R * T_p}{K * \eta_n} * \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (11)$$

Sendo, \dot{m}_p a vazão mássica do fluido primário.

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{P_p}{P_p} * \frac{\left(\frac{P_1}{P_b}\right) * \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{P_b}\right)^{\frac{k-1}{k}}}}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} * \sqrt{(1+w) * \left(1 + w * \frac{T_s}{T_p}\right) * \left(1 - \frac{2}{K+1}\right)}} \quad (12)$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{1}{M_1^2} * \left[\frac{2}{k+1} * \left(1 + \frac{k-1}{2} * M_1^2\right)\right]^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (13)$$

Neste trabalho, a condição de saturação para a água é descrita pela equação de Antoine na forma da equação (14); já a capacidade calorífica da água dividida pela constante do gás é avaliada em função da temperatura do fluido secundário conforme a equação (15):

$$T_{sat} = \frac{1687,537}{5,11564 - \log_{10} P_{sat}} + 42,98 \quad (14)$$

$$\frac{cp}{R} = 3,47 + 0,00145 * T_s + \frac{12100}{T_s^2} \quad (15)$$

MÉTODO

A metodologia de modelagem empregada neste trabalho é dividida em três programações, efetuadas e resolvidas no simulador MATLAB®. Para a simulação, consideraram-se os dados apresentados por El-Dessouky et al. (2002), sendo os fluidos secundário e primário, a água.

A primeira programação, denominada como Modelo Projeto, foi realizada para se obter os valores das áreas das seções 1, 2 e 3 a partir da especificação das pressões na entrada e saída do ejetor e da razão entre as vazões de fluido primário e secundário. O modelo permite ainda verificar a sensibilidade à variação do valor do parâmetro k decorrente da temperatura. Os valores dos rendimentos η_d e η_n podem também ser considerados variáveis de otimização, existindo a possibilidade de fixação de seus valores. O modelo empregado neste processo é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} & \min c \\ \text{s. a.} \quad & P_4 - P_3 * \left(\frac{1 + k * M_3^2}{1 + k * M_4^2} \right) = 0 \\ & P_b - P_4 * \left[\frac{\eta_d * (k - 1)}{2} * M_4^2 + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}} = 0 \\ & \frac{P_b}{P_s} - \alpha = 0 \end{aligned}$$

Sendo, c uma constante real qualquer, α o valor especificado para a razão entre a pressão de saída P_B e a pressão do fluido secundário P_s , P_4 a pressão na seção 4, η_d o rendimento no difusor, M_3 , M_4 e k , conforme as equações anteriores.

A segunda programação, denominada como Modelo Avaliação, foi realizada com a finalidade de avaliar as áreas das seções do ejetor apresentadas na literatura, compiladas por El-Dessouky et al. (2002). Esta modelagem considera os valores de P_p , P_s indicados nas referências, sendo obtidos os valores de P_b e w . Para a avaliação, devem ser fornecidas as medidas de A_1/A_2 e A_1/A_3 . Segue o modelo empregado neste processo:

$$\min(P_b - P_{b,exp})^2 + (w - w_{exp})^2$$

$$s. a. \quad P_4 - P_3 * \left(\frac{1 + k * M_3^2}{1 + k * M_4^2} \right) = 0$$

$$P_b - P_4 * \left[\frac{\eta_d * (k - 1)}{2} * M_4^2 + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}} = 0$$

$$\sqrt{\frac{1}{M_1^2} * \left(\frac{2}{k + 1} * \left(1 + \frac{k - 1}{2M_1^2} \right) \right)^{\frac{k+1}{k-1}} - \frac{A_2}{A_1}} = 0$$

$$\frac{\frac{P_b}{P_p} * \left(\frac{1}{(1 + w) * (1 + w * \frac{T_s}{T_p})} \right)^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{P_1}{P_b} \right)^{\frac{1}{k}} * \left(1 - \frac{P_1}{P_b} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{k + 1} \right)^{\frac{1}{k-1}} * \left(1 - \frac{2}{k + 1} \right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{A_1}{A_3} = 0$$

$$\frac{\sqrt{R_{gás} * \frac{T_p}{k * N_n} * \left(\frac{a_4}{2} \right)^{\frac{a_4}{a_1}}}}{P_p} - A_1 mp = 0$$

A terceira programação, denominada como Modelo de Cálculo da razão A_1/A_3 , foi realizada com a finalidade de calcular A_1/A_3 . Esta modelagem faz uso dos valores de P_b , w e A_2/A_1 indicados nas referências.

Modelo empregado

$$\min(P_b - P_{b,exp})^2 + (w - w_{exp})^2$$

$$s. a. \quad P_4 - P_3 * \left(\frac{1 + k * M_3^2}{1 + k * M_4^2} \right) = 0$$

$$P_b - P_4 * \left[\frac{\eta_d * (k - 1)}{2} * M_4^2 + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}} = 0$$

$$\frac{A_2}{A_1} m - \sqrt{\frac{1}{M_1^2} * \left(\frac{2}{k+1} * \left(1 + \frac{k-1}{2M_1^2} \right) \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = 0$$

$$\frac{A_1}{A_3} m - \frac{\frac{P_b}{P_p} * \left(\frac{1}{(1+w) * (1+w * \frac{T_s}{T_p})} \right)^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{P_1}{P_b} \right)^{\frac{1}{k}} * \left(1 - \frac{P_1}{P_b} \right)^{\frac{k-1}{2}}}{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} * \left(1 - \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{2}}} = 0$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 mostra os resultados de simulação obtidos para o modelo projeto, os quais fazem uso dos dados compilados por El-Dessouky et al. (2002). Consideraram-se os rendimentos como variáveis de otimização. Observa-se a concordância com os dados da literatura, tendo ocorrido falha de convergência em apenas 4 situações, correspondentes a condições extremas de projeto. Destes quatro casos, observa-se que se conseguiu obter uma solução em 3 situações. Para as situações em que não houve falhas de convergência o número de iterações requerido para a resolução está entre 3 e 6, sendo as simulações muito rápidas (inferior a 1s em computador com processador Intel i5).

Tabela 1: Resultados da simulação do Modelo Projeto por meio de um problema de otimização e comparação com valores da literatura

P_p (bar)	P_s (10^{-2}) (bar)	W	η_n	η_d	P_b artigo (10^{-2}) (bar)	P_b cálculo (10^{-2}) (bar)	P_1 (10^{-2}) (bar)	P_4 (10^{-2}) (bar)	$\frac{A_1}{A_3}$ (10^{-2})	$\frac{A_2}{A_1}$ (10^2)	$\frac{A_1}{\dot{m}_p}$ (10^2) (m ² s/kg)
1,987	1,23	0,59	0,850	0,950	3,8	3,8	0,39	0,033	0,630	0,204	3,453
2,323	1,23	0,54	0,850	0,950	4,2	4,2	0,42	0,037	0,610	0,217	2,973
2,703	1,23	0,47	0,850	0,950	4,7	4,7	0,44	0,041	0,580	0,234	2,571
3,133	1,23	0,39	0,850	0,950	5,3	5,3	0,45	0,047	0,560	0,257	2,232
3,616	1,23	0,31	0,850	0,950	6,0	6,0	0,44	0,053	0,530	0,286	1,946
1,987	1,04	0,50	0,850	0,950	3,6	3,6	0,34	0,032	0,600	0,226	3,453
2,323	1,04	0,42	0,850	0,950	4,1	4,1	0,36	0,036	0,580	0,244	2,973
2,703	1,04	0,36	0,850	0,950	4,6	4,6	0,37	0,041	0,560	0,265	2,571
3,133	1,04	0,29	0,850	0,950	5,1	5,1	0,36	0,045	0,510	0,301	2,232
3,616	1,04	0,23	0,850	0,950	5,7	5,7	0,35	0,051	0,480	0,337	1,946
1,987	0,87	0,40	0,850	0,950	3,4	3,4	0,28	0,030	0,560	0,259	3,453
2,323	0,87	0,34	0,850	0,950	3,7	3,7	0,27	0,033	0,500	0,294	2,973
2,703	0,87	0,28	0,850	0,950	4,4	4,4	0,30	0,039	0,510	0,303	2,571
3,133	0,87	0,25	0,850	0,950	5,1	5,1	0,34	0,045	0,520	0,308	2,232
3,616	0,87	0,18	0,850	0,950	5,4	5,4	0,29	0,049	0,430	0,384	1,946
8,340	1,59	0,58	0,850	0,950	3,2	3,2	0,19	0,029	0,090	0,955	0,877
4,000	1,59	1,13	0,850	0,950	3,07	3,07	0,34	0,027	0,200	0,371	1,767
6,690	1,71	0,58	0,850	0,950	3,67	3,67	0,24	0,033	0,140	0,692	1,082
8,410	1,59	0,51	0,850	0,950	3,51	3,51	0,20	0,032	0,100	0,928	0,870
6,900	1,94	0,86	0,850	0,950	3,38	3,38	0,26	0,030	0,120	0,660	1,050
6,900	1,94	0,91	0,850	0,950	3,51	3,51	0,29	0,031	0,130	0,612	1,050
2,700	0,87	0,22	0,850	0,950	4,10	4,10	0,23	0,037	0,440	0,368	2,574
2,700	0,87	0,19	0,850	0,950	4,20	4,20	0,22	0,038	0,440	0,380	2,574
2,700	0,87	0,16	0,850	0,950	4,4	4,4	0,22	0,040	0,450	0,384	2,574
2,700	0,87	0,14	0,850	0,950	4,5	4,5	0,21	0,041	0,450	0,391	2,574
2,700	0,87	0,11	0,850	0,950	4,7	4,7	0,20	0,043	0,460	0,401	2,574
6,600	1,55	0,27	0,850	0,950	5,3	5,3	0,26	0,048	0,210	0,643	1,096
5,780	1,55	0,31	0,850	0,950	5,3	5,3	0,29	0,048	0,250	0,536	1,243
5,160	1,58	0,35	0,850	0,950	5,3	5,3	0,32	0,047	0,290	0,460	1,386
4,400	1,57	0,38	0,850	0,950	5,3	5,3	0,33	0,045	0,330	0,406	1,613
3,810	1,59	0,42	0,850	0,950	4,77	4,77	0,33	0,042	0,360	0,363	1,851
3,120	1,62	0,46	0,850	0,950	4,23	4,23	0,30	0,038	0,390	0,337	2,241
2,780	1,68	0,42	0,850	0,950	4,1	4,1	0,27	0,037	0,420	0,332	2,503
1,434	1,23	0,59	0,850	0,950	2,53	2,53	0,21	0,022	0,510	0,254	4,722

1,692	1,23	0,51	0,850	0,950	2,67	2,67	0,20	0,024	0,450	0,295	4,029
1,987	1,23	0,43	0,850	0,950	3,15	3,15	0,22	0,028	0,460	0,304	3,453
2,323	1,23	0,35	0,850	0,950	4,0	4,0	0,28	0,036	0,520	0,292	2,973
2,703	1,23	0,29	0,850	0,950	4,75	4,75	0,31	0,042	0,530	0,299	2,571
17,200	57,70	0,50	0,873	0,929	143	143	17,73	1,235	3,190	0,072	0,435
17,200	51,40	0,40	0,892	0,911	143	143	16,02	1,248	3,210	0,080	0,430
17,200	45,50	0,30	0,906	0,897	143	143	14,08	1,261	3,180	0,090	0,427
17,200	37,01	0,27	0,921	0,882	143	143	14,15	1,263	3,260	0,092	0,423
1,160	67,60	0,62	0,597	1,000	119,9	119,9	65,04	0,134	64,290	0,011	6,901
1,530	67,60	0,49	0,352	0,999	151,7	151,7 ⁽²⁾	66,68	0,105	65,620	0,011	6,952
2,700	67,60	0,34	0,885	0,995	224,1	224,1 ⁽¹⁾	58,98	1,528	51,380	0,013	2,373
1,980	121,3	0,78	0,444	1,000	195,1	195,1	109,2	0,221	55,780	0,011	4,757
1,980	99,90	0,64	0,476	1,000	195,1	195,1 ⁽²⁾	96,68	0,176	60,400	0,011	4,742
1,980	67,60	0,37	1,000	1,000	186,2	186,1 ⁽²⁾	63,91	1,077	63,130	0,011	3,194
0,579	1,02	0,57	1,000	1,000	2,3	2,3	0,20	0,020	1,210	0,193	10,417
0,474	1,02	0,56	1,000	1,000	2,3	2,3	0,20	0,020	1,450	0,171	12,633
0,386	1,70	0,57	1,000	1,000	2,3	2,3	0,18	0,020	1,670	0,156	15,401

⁽¹⁾ Ocorreu falha de convergência: número de iterações especificado foi excedido.

⁽²⁾ Ocorreu falha de convergência: o algoritmo retornou com a mensagem de que não conseguiu encontrar uma solução viável.

A tabela 2 mostra os resultados da simulação para o Modelo Avaliação, utilizando-se os valores dos diâmetros constantes na referência. Consideraram-se os dados adotados por El-Dessouky com rendimentos variáveis. Dentre as oito referências de artigos citadas por El-Dessouky et al.(2002), somente os valores fornecidos pela literatura de I.W. Eames, S. Aphornaratana, H. Haider (1995) possibilitaram a reprodução do P_b fornecido no artigo.

Tabela 2: Resultados da simulação do Modelo Avaliação por meio de um problema de otimização e comparação com valores da literatura de I.W. Eames, S. Aphornaratana, H. Haider (1995).

P_p (bar)	P_s (10^{-2}) (bar)	W	η_n	η_d	P_b artigo (10^{-2}) (bar)	P_b cálculo (10^{-2}) (bar)	P_1 (10^{-2}) (bar)	P_4 (10^{-2}) (bar)	$\frac{A_1}{A_3}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_2}{A_1}$ cálculo (10^2)	$\frac{A_1}{\dot{m}_p}$ (10^2) (m ² s/kg)
1,987	1,23	0,59	1,000	1,000	3,8	3,8	0,91	4,79	1,230	0,160	3,180
2,323	1,23	0,54	1,000	1,000	4,2	4,2	1,06	5,21	1,230	0,160	2,737
2,703	1,23	0,47	0,992	1,000	4,7	4,7	1,21	5,59	1,230	0,160	2,377
3,133	1,23	0,39	0,946	1,000	5,3	5,3	1,21	6,81	1,230	0,160	2,114
3,616	1,23	0,31	0,904	1,000	6	6	1,22	8,34	1,230	0,160	1,885
1,987	1,04	0,5	1,000	0,596	3,6	3,6	0,91	4,63	1,230	0,160	3,180
2,323	1,04	0,42	0,970	0,856	4,1	4,1	0,97	5,21	1,230	0,160	2,779
2,703	1,04	0,36	0,940	1,000	4,6	4,6	1,03	5,9	1,230	0,160	2,441
3,133	1,04	0,29	0,897	1,000	5,1	5,1	1,03	7,31	1,230	0,160	2,170
3,616	1,04	0,23	0,857	1,000	5,7	5,7	1,04	9,14	1,230	0,160	1,935
1,987	0,87	0,4	0,961	0,835	3,4	3,4	0,81	4,52	1,230	0,160	3,244
2,323	0,87	0,34	0,932	1,000	3,7	3,7	0,86	5,12	1,230	0,160	2,835
2,703	0,87	0,28	0,888	1,000	4,4	4,4	0,86	6,41	1,230	0,160	2,512
3,133	0,87	0,25	0,847	1,000	5,1	5,1	0,87	8,11	1,230	0,160	2,233
3,616	0,87	0,18	0,810	1,000	5,4	5,4	0,87	10,38	1,230	0,160	1,991

A simulação realizada com as demais referências citadas por El-Dessouky, i.e., no Modelo Avaliação não conseguem reproduzir os valores de P_b artigo devido à ocorrência de falhas de convergência impossibilitando o algoritmo de encontrar soluções viáveis.

As tabelas 3 a 6 mostram os resultados de simulação obtidos para o Modelo de Cálculo com os dados compilados por El-Dessouky et al. (2002). Consideraram-se os valores das variáveis. Sendo o objetivo da programação, calcular os valores de $\frac{A_1}{A_3}$. Desta forma, consegue-se obter o valor do diâmetro na seção da garganta do ejetor.

Tabela 3: Resultados da simulação do Modelo A_1/A_3 por meio de um problema de otimização e comparação com valores da literatura de I.W. Eames, S. Aphornaratana, H. Haider (1995).

P_p (bar)	P_s (10^{-2}) (bar)	W	η_n	η_d	P_b artigo (10^{-2}) (bar)	P_b cálculo (10^{-2}) (bar)	P_1 (10^{-2}) (bar)	P_4 (10^{-2}) (bar)	$\frac{A_1}{A_3}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_2}{A_1}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_1}{\dot{m}_p}$ (10^2) (m ² s/kg)
1,987	1,230	0,59	0,779	0,945	3,800	3,800	0,420	3,290	0,660	0,16	3,603
2,323	1,230	0,54	0,763	0,944	4,200	4,200	0,460	3,640	0,640	0,16	3,134
2,703	1,230	0,47	0,743	0,942	4,700	4,700	0,490	4,090	0,630	0,16	2,746
3,133	1,230	0,39	0,720	0,941	5,300	5,300	0,520	4,630	0,620	0,16	2,421
3,616	1,230	0,31	0,696	0,940	6,000	6,000	0,540	5,270	0,600	0,16	2,148
1,987	1,040	0,5	0,752	0,943	3,600	3,600	0,380	3,130	0,640	0,16	3,667
2,323	1,040	0,42	0,733	0,942	4,100	4,100	0,400	3,570	0,630	0,16	3,198
2,703	1,040	0,36	0,713	0,940	4,600	4,600	0,430	4,030	0,620	0,16	2,804
3,133	1,040	0,29	0,684	0,938	5,100	5,100	0,440	4,490	0,590	0,16	2,485
3,616	1,040	0,23	0,660	0,938	5,700	5,700	0,450	5,040	0,560	0,16	2,206
1,987	0,870	0,4	0,718	0,941	3,400	3,400	0,320	2,970	0,610	0,16	3,753
2,323	0,870	0,34	0,688	0,938	3,700	3,700	0,330	3,250	0,570	0,16	3,300
2,703	0,870	0,28	0,682	0,937	4,400	4,400	0,370	3,880	0,590	0,16	2,865
3,133	0,870	0,25	0,681	0,902	5,100	5,100	0,430	4,510	0,600	0,16	2,490
3,616	0,870	0,18	0,635	0,913	5,400	5,400	0,390	4,810	0,530	0,16	2,249

Tabela 4: Resultados da simulação do Modelo A_1/A_3 por meio de um problema de otimização e comparação com valores da literatura J.T. Munday, D.F. Bagster (1977).

P_p (bar)	P_s (10^{-2}) (bar)	W	η_n	η_d	P_b artigo (10^{-2}) (bar)	P_b cálculo (10^{-2}) (bar)	P_1 (10^{-2}) (bar)	P_4 (10^{-2}) (bar)	$\frac{A_1}{A_3}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_2}{A_1}$ cálculo (10^2)	$\frac{A_1}{\dot{m}_p}$ (10^2) (m ² s/kg)
8,340	1,59	0,58	0,703	0,943	3,20	3,20	0,21	2,85	0,10	0,519	0,962
4,000	1,59	1,13	0,868	0,951	3,07	3,07	0,21	2,21	0,15	0,519	1,745
6,690	1,71	0,58	0,784	0,947	3,67	3,67	2,5	3,27	0,14	0,519	1,124
8,410	1,59	0,51	0,711	0,944	3,51	3,51	0,22	3,13	0,11	0,519	0,949
6,900	1,94	0,86	0,796	0,947	3,38	3,38	0,27	2,99	0,12	0,519	1,083
6,900	1,94	0,91	0,818	0,948	3,51	3,51	0,30	3,09	0,13	0,519	1,069

Tabela 5: Resultados da simulação do Modelo A_1/A_3 por meio de um problema de otimização e comparação com valores da literatura S. Aphornratana, I.W. Eames (1997).

P_p (bar)	P_s (10^{-2}) (bar)	W	η_n	η_d	P_b artigo (10^{-2}) (bar)	P_b cálculo (10^{-2}) (bar)	P_1 (10^{-2}) (bar)	P_4 (10^{-2}) (bar)	$\frac{A_1}{A_3}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_2}{A_1}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_1}{\dot{m}_p}$ (10^2) (m ² s/kg)
2,7	0,87	0,22	0,641	0,939	4,100	4,100	0,300	3,630	0,520	0,16	2,961
2,7	0,87	0,19	0,635	0,939	4,200	4,200	0,300	3,730	0,530	0,16	2,974
2,7	0,87	0,16	0,634	0,940	4,400	4,400	0,290	3,920	0,550	0,16	2,976
2,7	0,87	0,14	0,631	0,941	4,500	4,500	0,290	4,010	0,560	0,16	2,983
2,7	0,87	0,11	0,628	0,941	4,700	4,700	0,290	4,200	0,580	0,16	2,989

Tabela 6: Resultados da simulação do Modelo A_1/A_3 por meio de um problema de otimização e comparação com valores da literatura D. Sun (1996).

P_p (bar)	P_s (10^{-2}) (bar)	W	η_n	η_d	P_b artigo (10^{-2}) (bar)	P_b cálculo (10^{-2}) (bar)	P_1 (10^{-2}) (bar)	P_4 (10^{-2}) (bar)	$\frac{A_1}{A_3}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_2}{A_1}$ cálculo (10^{-2})	$\frac{A_1}{\dot{m}_p}$ (10^2) (m ² s/kg)
1,434	1,230	0,590	0,860	0,905	2,530	1,920 ⁽³⁾	0,130	1,700	0,340	0,36	4,689
1,692	1,230	0,510	0,852	0,950	2,670	2,250 ⁽³⁾	0,150	2,000	0,350	0,36	4,019
1,987	1,230	0,430	0,903	0,952	3,150	3,150	0,210	2,800	0,440	0,36	3,345
2,323	1,230	0,350	0,915	0,953	4,000	4,000	0,260	3,560	0,500	0,36	2,861
2,703	1,230	0,290	0,907	0,952	4,750	4,750	0,290	4,240	0,510	0,36	2,486

⁽³⁾ Ocorreu falha de convergência: número de iterações especificado foi excedido.

CONCLUSÃO/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

As referências utilizadas no desenvolvimento do projeto valeram-se de procedimentos iterativos para obter resultados a partir dos dados que possuíam. Citam que o procedimento é tedioso. Neste trabalho, reformulou-se o procedimento de simulação do modelo, transformando-o em problemas de otimização da programação não linear, para os quais, uma estimativa inicial, usualmente qualquer é fornecida e a solução é obtida automaticamente. Três problemas diferentes foram propostos. Um modelo foi proposto para o dimensionamento dos ejetores e outro para a avaliação. No modelo de avaliação, observaram-se discrepâncias entre os valores de pressão calculados pelo programa e os constantes do artigo. Suspeitou-se que a razão para as discrepâncias pudessem ser uma interpretação incorreta ou a ausência de determinadas dimensões dos ejetores dos trabalhos da literatura. Assim, desenvolveu-se um outro modelo de otimização que

permitisse calcular dimensões do ejetor e avalia-lo simultaneamente. Os resultados de referências da literatura serviram para avaliar a metodologia proposta. A partir dos resultados dos três métodos programados no simulador MATLAB, foi observado que a modelagem empregada é flexível e de fácil utilização e permite análises dos parâmetros de modelagem. Salienta-se que por ser uma metodologia baseada na programação não linear os modelos desenvolvidos podem ser implementados em simuladores de processos que fazem uso da programação não linear como procedimento de resolução de equações algébricas não lineares, como os simuladores de processo EMSO e ROMEo.

REFERÊNCIAS

- (1) EAMES, I.W.; APHORNRATANA, S., A small capacity steam-ejector refrigerator: experimental investigation of a system using ejector with moveable primary nozzle, Int. J. Refrig. 20 (1997) 352–358.
- (2) EAMES, I.W.; APHORNRATANA, S.; HAIDER, H. A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator. Int. J. Refrig., v. 18, n.6, p. 378-386, 1995
- (3) EL-DESSOUKY, H., ETTOUNEY, H., ALATIQUI, I., AL-NUWAIBIT, G. Evaluation of steam jet ejectors. Chem. Eng. and Processing, v. 41, p. 551-561, 2002
- (4) KEENAN, J.H., NEUMANN, E.P., LUSTWERK, F. An investigation of ejector design by analysis and experiment. J. of Appl. mechanics, p. 299-309 1950
- (5) MUNDAY, J.T.; BAGSTER, D.F. A new ejector theory applied to steam jet refrigeration. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., v. 18, n.4, p. 442-449, 1977
- (6) SUN, D., Variable geometry ejectors and their applications in ejector refrigeration systems, Energy 21 (1996) 919–929.

CONTATO: preisjessicafolgaz@yahoo.com.br e miriamtg_br@yahoo.com