

PROJETO DO EJETOR DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR JATO COMPRESSÃO DE VAPOR

Luiz Carlos Pereira VARGAS (1); Cleiton Rubens Formiga BARBOSA, (2); Francisco de Assis Oliveira FONTES (3); Igor Marcel Gomes ALMEIDA (4).

(1) IFBA, Endereço: Rua Emídio dos Santos, s/n - Barbalho - Salvador - Bahia. CEP: 40301-015, telefone: (71) 2102-9480, fax: (71) 2102-9481, e-mail: vargas@ifba.edu.br ,

(2) UFRN, Endereço: PPGEM Centro de Tecnologia CEP 59.072-970- Natal - RN, telefone: (84) 3215-3740, e-mail: cleiton@ufrnet.br ,

(3) UFRN, Endereço: PPGEM, Centro de Tecnologia CEP 59.072-970- Natal - RN, telefone: (84) 3215-3740, e-mail: franciscofontes@uol.com.br,

(4) UFRN, Endereço: PPGEM Centro de Tecnologia CEP 59.072-970- Natal - RN, telefone: (84) 3215-3740, e-mail: igormarcel2002@yahoo.com.br.

RESUMO

A utilização do calor residual de equipamentos e rejeitos térmicos de sistemas de conversão de energia para produzir frio, é uma forma muito interessante de melhoria da eficiência dos sistemas energéticos. O presente artigo se destina ao estudo teórico e experimental das características um novo sistema de refrigeração intermitente por ejetor (jato-compressão de vapor), com uso de calor residual. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a tecnologia de sistemas de refrigeração por jato-compressão. Na fase seguinte investigou-se a concepção do principal elemento da proposta do sistema de refrigeração, o ejetor. No projeto deste elemento, foram utilizados modelos empíricos disponíveis na literatura. Com o auxílio do software EES (Engineering Equation Solver) foram realizadas simulações com diferentes fluidos refrigerantes sintéticos. O R141b apresentou as melhores propriedades termodinâmicas e de transporte para o funcionamento eficaz do protótipo. Com base nos resultados da simulação foi dimensionado o ejetor do sistema de refrigeração proposto.

Palavras-chave: ejetor, rejeitos térmicos, refrigeração por ejetor, ciclo de refrigeração intermitente.

1. INTRODUÇÃO

Em processos de combustão, para transformar a energia térmica em energia mecânica, uma parte significativa da energia é desperdiçada como resíduo no meio ambiente. O calor rejeitado pode ser utilizado em sistemas de refrigeração por absorção, adsorção ou por ejetor. O sistema de refrigeração com ejetor é uma alternativa à utilização de energias renováveis e de resíduos térmicos, mas não é utilizado massivamente por causa de baixo coeficiente de desempenho COP, em comparação com os demais sistemas de refrigeração. Atualmente a refrigeração por absorção está sendo utilizada em diversas aplicações, principalmente em cogeração.

Um sistema de refrigeração com ejetor é similar a um sistema de compressão de vapor, exceto para o método de compressão do refrigerante. Um ejetor é usado no lugar de um compressor mecânico para comprimir o vapor de refrigerante a partir do evaporador para o condensador. Sistemas econômicos podem ser obtidos quando aproveitados os resíduos de calor, energia solar ou rejeitos térmicos. Estes sistemas têm vantagens em relação aos sistemas de compressão de vapor, a saber: não tem partes móveis, não requerem lubrificação, baixo custo e pequena manutenção operação, além de aproveitar energia barata.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas sobre este sistema. Al-Khalidy (1998) apresenta os conceitos do sistema de refrigeração por jato de vapor, orienta sobre a seleção de fluido refrigerante e propõe um método para avaliar estes sistemas utilizando como refrigerante R113. Huang e Chang (1999) desenvolveram duas correlações empíricas para ejetores utilizando R141b como fluido de trabalho, um método de cálculo para o projeto de ejetor, utilizando as correlações também é desenvolvida. R141b é mostrado no presente estudo, como um bom fluido de trabalho para um sistema com ejetor. Huang et al. (1999) introduziu um novo conceito, como uma câmara de mistura do ejetor a pressão constante onde a mistura dos fluxos primários e secundários ocorre dentro da área de constante seção.

A predição do desempenho do ejetor operando em modo crítico é realizada utilizando um modelo de fluxo unidimensional. Cizungu et al. (2001) concluiu através da simulação computacional de um sistema de refrigeração por jato-compressão, utilizando como fluidos de trabalho R123, R134a, R152a e R717 (amônia) que, para diferentes temperaturas de geração, a taxa de arraste do fluido secundário e a eficiência do sistema (COP) dependem principalmente da geometria do ejetor e da taxa de compressão. Chunnanond e Aphornratana (2004) fez uma revisão da literatura sobre ejetores e suas aplicações em refrigeração, abordando questões relacionadas à teoria do ciclo, o desempenho característico, fluido de trabalho etc. Yapici (2008) apresentou um estudo experimental de desenvolvimento de um ejetor com área constante para vários refrigerante operando em baixa pressão, verificando a influência de vários parâmetros de funcionamento.

O objetivo desta investigação foram o dimensionamento e o desenvolvimento do ejetor de um sistema de refrigeração por jato-compressão, operando no modo intermitente com R141b. Para a análise em questão, serão utilizados neste trabalho a plataforma EES (Engineering Equation Solver) e o método empírico, proposto por Huang e Chang (1999), onde são usados para correlacionar o desempenho do ejetor a razão entre a área da garganta hipotético do fluxo arrastado e a área da garganta do bocal do fluxo primário A_e/A_t , os parâmetros geométricos de projeto do ejetor, a razão entre a área da câmara de mistura e a área do bocal primário A_3/A_6 , e a razão entre as pressões de geração e de evaporação, P_g/P_e , e a pressão crítica de condensação e a pressão de evaporação P_c^*/P_e .

1 O MODELO DO CICLO

A configuração do sistema de refrigeração proposto é mostrada na Fig. 1. O sistema é composto de um gerador de vapor, que usa o calor a partir de qualquer fonte de calor; um ejetor, que é o principal elemento deste sistema; um condensador, através do qual os fluxos de calor são descartados para fora do sistema; um

evaporador, onde o frio é produzido; um tubo capilar, que introduz uma perda de carga; um acumulador e três válvulas solenóides.

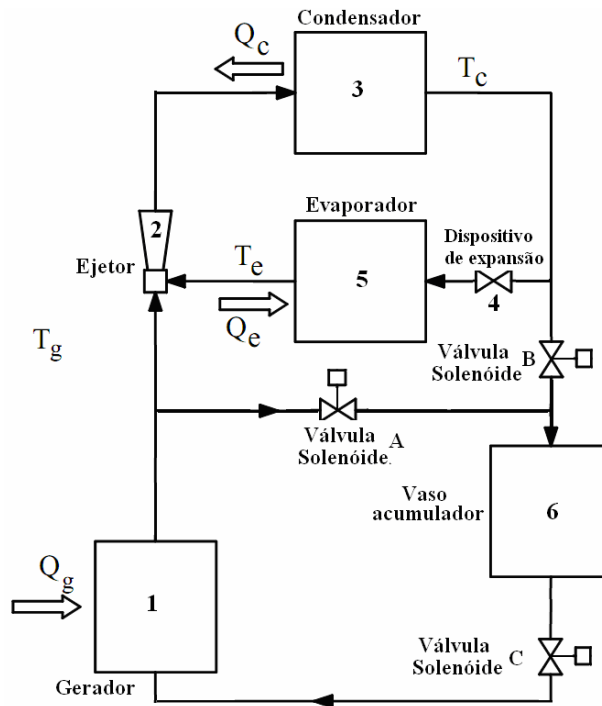


Fig. 1 - Diagrama do sistema de refrigeração por jato-compressão de vapor intermitente

Este sistema de refrigeração tem duas fases de operação:

- I) Fase de produção de frio: trabalha com as válvulas solenóides (A) e (C) fechadas e a válvula solenóide (B) aberta. O calor (Q_g) é fornecido para o gerador (1), que libera vapor a alta pressão e na temperatura de geração (T_g), que passa pelo ejedor (2) arrastando o vapor do evaporador (5), reduzindo sua pressão e a temperatura de evaporação (T_e), produzindo o frio na câmara fria, ao retirar o calor (Q_e) do ambiente, que é o calor latente de vaporização do fluido refrigerante. Os vapores são misturados no ejedor (2) e conduzidos ao condensador (3) onde será liquefeito, descartando o calor (Q_c) do sistema, que é o calor latente de condensação do fluido refrigerante e parte deste condensado vai para o evaporador (5) através do tubo capilar (4) e a outra parte é armazenada no acumulador (6);
- II) Fase de recarga de refrigerante: as válvulas solenóide (A) e (C) são abertas e a válvula solenóide (B) é fechada. O fluido de trabalho acumulado no vaso (6) é transferido para o gerador (1), completando o ciclo de refrigeração intermitente.

2 SELEÇÃO DO REFRIGERANTE

A seleção do refrigerante foi definida em função da característica da linha de vapor saturado no diagrama T-S e do princípio de funcionamento do ejedor. Em primeiro lugar, se a inclinação da curva de vapor saturado seco for negativa, na expansão isentrópica do fluido de trabalho, este irá condensar, diz-se então, que o vapor é úmido e, neste caso, é necessário superaquecer o vapor para não causar um mau funcionamento do ejedor. Como no sistema proposto o refrigerante não é superaquecido, priorizou-se a operação com fluidos secos. Em segundo lugar, se a inclinação da curva de vapor saturado for positiva, a expansão vai superaquecer o vapor, neste caso, não haverá necessidade de superaquecimento, diz-se que o vapor é seco, o que é desejável. Chunnanond e Aphornratana (2004) enumeraram os fatores mais importantes para seleção do refrigerante para estes sistemas: a) o líquido deve ter um grande calor latente de vaporização, de forma a minimizar a taxa de circulação por unidade de capacidade de refrigeração, b) a pressão hidrostática no gerador de vapor não deve ser demasiado elevada, a fim de evitar vasos de construção pesada; c) o fluido deve ser quimicamente estável, não-tóxico, não explosivo, não corrosivo, ecológicos e de baixo custo; d) o refrigerante com menor valor de massa molecular exige comparativamente maiores ejtores para sistemas de mesmas capacidades. As dificuldades de construção dos componentes de ejtores de pequeno porte devem ser consideradas. No entanto, o fluido de maior massa molecular leva a um aumento da taxa de arraste e a

eficiência do ejetor. A Tabela 1 mostra os refrigerantes pré-selecionados para a operação e suas respectivas características.

Tabela 1. Fluidos de trabalho de sistemas de refrigeração com ejetor. Chunnanond an Aphornratana (2004)

Características	R11	R12	R113	R123	R141b	R134a	R718b (Água)
Ponto de evaporação (°C) a 1atm	23,7	29,8	47,6	27,9	32,1	26,1	100
Pressão (kPa) a 100°C	824	3343	438	787	677	3972	101
Massa molecular (kg/kmol)	137,38	120,92	187,39	152,93	116,9	102,03	18,02
Calor latente a 10°C	186,3	147,6	155,3	176,8	129,4	190,9	2257
GWP 1	1	3	1,4	0,02	0,15	0,26	0
ODP 2	1	0,9	0,8	0,016	0	0,02	0
Vapor seco ou úmido	Úmido	Úmido	Seco	Seco	Seco	Úmido	Úmido

¹ (Global warming potential); ² (Ozone depletion potential)

A análise da Tabela 1 revela que o R718b, (água), apresenta as características ideais para o funcionamento do sistema proposto, no entanto, existem algumas desvantagens. Usando a água como refrigerante a temperatura de refrigeração limite deverá estar acima de 0°C e o sistema deve estar sob condição de vácuo. Além disso, a água tem grande volume específico nas condições típicas do evaporador e para minimizar a perda de pressão, o diâmetro da tubulação deve ser grande para atender ao grande fluxo volumétrico (Chunnanond e Aphornratana, 2004). A seleção final limitou-se aos fluidos: R123 e R141b, escolhendo o fluido R141b, que é abundante e de baixo custo, além do bom desempenho termodinâmico nos sistemas de refrigeração por jato-compressão de vapor, de acordo com Huang et al. (1999), Huang e Chang (1999) e Chunnanond e Aphornratana (2004). Vários outros refrigerantes foram utilizados no sistema de refrigeração de jato de vapor. Sankarlal e Mani (2007) utilizou a amônia (R717) de forma satisfatória. Selvaraju e Mani (2004) fez uma análise comparativa do desempenho do ejetor operando com R134a, R152a, R290, R600 e R717. Eles concluíram que o R134a dá um melhor desempenho e maior razão crítica de arraste, em comparação com os outros refrigerantes. Alexis e Katsanis (2004) propuseram um sistema de refrigeração por jato de vapor com metanol para avaliar o COP em função da variação das pressões e temperaturas de geração, condensação e evaporação, e concluiu que a uma maior eficiência operacional pode ser obtida, para uma determinada temperatura de evaporação, com o aumento da pressão do gerador. Sun (1999) comparou o desempenho dos refrigerantes: R718, R11, R12, R13, R21, R123, R142b, R134a, R152a, RC318 e R500. A autora concluiu que, para CFC's, o R12 apresenta melhor desempenho, para os HCFC, o R142b tem o melhor COP; os HFC testados possuem desempenho semelhante, sendo que o R152a teve o melhor desempenho entre todos os outros refrigerantes. Utilizando os HFC, que não causam redução do ozônio, também se produz benefícios ambientais suplementares.

3 O EJETOR

O ejetor é o elemento chave do sistema de refrigeração de jato-compressão de vapor, foi descoberto, por Charles Parsons quando fazia vácuo em condensadores para turbinas a vapor. O sistema de refrigeração de jato-compressão de vapor foi estudado, em primeiro lugar, por Leblanc em 1910, Gosney, 1982 *apud* Chunnanong e Aphornratana, 2004. O ejetor consiste basicamente de quatro partes principais: bocal primário convergente-divergentes, câmara de sucção, câmara de mistura e difusor divergente. A câmara de mistura é classificada: a pressão constante e a volume constante. Neste trabalho será utilizada a câmara de mistura a volume constante. Huang e Chang (1999) define três modos operacionais para os ejetores de acordo com a contra-pressão (pressão de condensação): no modo crítico $P_c \leq P_c^*$, quando o fluxo primário e o fluxo arrastado entram em choque na câmara de mistura (são bloqueados); modo subcríticos enquanto apenas o fluxo é primário é bloqueado, e modo de mau funcionamento, quando tanto o fluxo primário e o fluxo secundário não são bloqueados. Para um melhor desempenho de um sistema de refrigeração a jato-compressão de vapor, o ejetor deverá ser projetado e operado no modo crítico. Onde P_c é a pressão de condensação, P_e é a pressão de evaporação, P_c^* é a pressão crítica de condensação e P_{co} é a condição limite

de pressão de condensação do ejetor no modo operacional. Neste trabalho usou $P_c = P_c^*$, como o melhor desempenho é obtido com a crítica modo.

No método de dimensionamento do ejetor foi assumido que a mistura dos dois fluxos (primário e secundário), ocorre em uma área efetiva A_e na câmara de mistura de volume constante e com base na correlação empírica proposta por Huang e Chang (1999). Se o desempenho é estimado pelo cálculo do quociente entre o fluxo primário e o fluxo secundário (ω) em função das relações entre a área efetiva (garganta hipotética), do fluxo secundário (A_e) e da garganta do bocal (A_t), o parâmetro de projeto geométrico para ejetor (A_3/A_t) e das pressões P_g , P_c e P_c^* . O fluxo primário parte do gerador e o fluxo secundário parte do evaporador. A Figura 2 mostra um modelo esquemático das regiões e suas dimensões características.

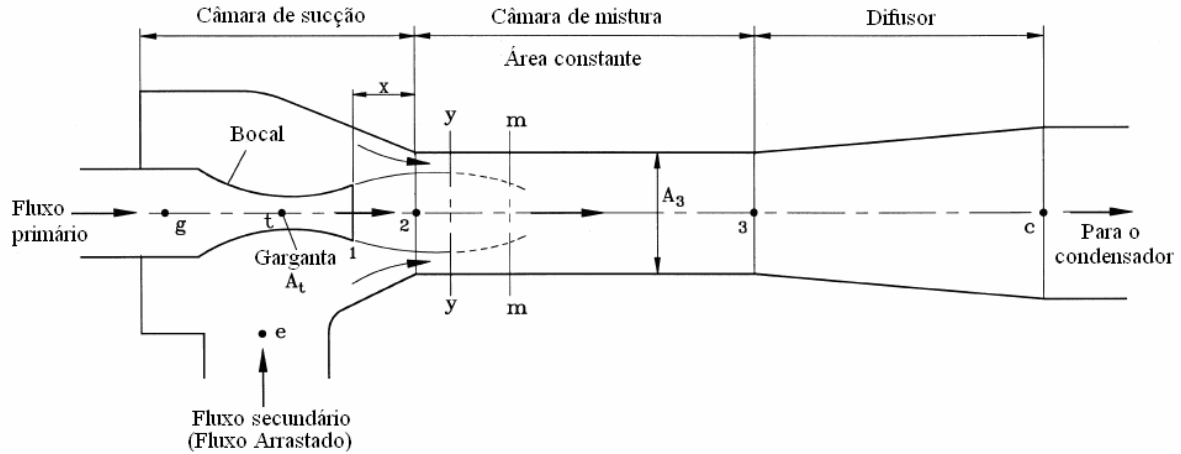


Fig 2. – Diagrama esquemático e dimensões características de um ejetor. Huang e Chang (1999)

3.1 Correlações empíricas do ejetor

Para o dimensionamento do ejetor com R141b, foi utilizado o método empírico proposto por Huang e Chang (1999). As dimensões características, apresentadas na Fig. 2, são determinadas com bases nas seguintes equações:

$$\frac{A_e}{A_t} = -0,0517 \left(\frac{A_3}{A_t} \right)^2 + 1,4362 \left(\frac{A_3}{A_t} \right) \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$\frac{A_3}{A_t} = b_0 + b_1 r_c + b_2 r_c^2 + b_3 r_g + b_4 r_c r_g + b_5 r_c^2 r_g + b_6 r_g^2 + b_7 r_c r_g^2 + b_8 r_c^2 r_g^2 \quad [\text{Eq. 02}]$$

Onde: $r_c = \frac{P_c^*}{P_e}$; $r_g = \frac{P_g}{P_e}$; $b_0 = 5,4497$; $b_1 = -6,7759$; $b_2 = 1,4952$; $b_3 = 2,3116$; $b_4 = -0,590$;

$$b_5 = 0,018105$$
; $b_6 = -0,03786$; $b_7 = 0,012983$; $b_8 = -0,000812145$

A_e é a área da garganta hipotética do fluxo secundário, A_t é a área da garganta do bocal e A_3 é a área da câmara de mistura. As equações (1) e (2) são as equações básicas do ejetor. O dimensionamento do ejetor é desenvolvido com base na mecânica dos fluidos e correlações empíricas, com auxílio do software EES (Engineering Equation Solver). Na tabela 2, são apresentados os dados de entrada do processo iterativo.

Tabela 2 - Variáveis operacionais do sistema de refrigeração por jato-compressão

Variáveis de entrada	Valor
Pressão do gerador (Pg)	0,53767 MPa
Temperatura do gerador (Tg)	90°C
Pressão do evaporador (Pe)	0,043496 MPa
Temperatura do evaporador (Te)	10°C
Pressão do condensador (Pc*)	0,13277 MPa
Temperatura do condensador (Tc*)	40°C

A tabela 3 mostra os resultados da aplicação às equações de iteração proposto na literatura.

Tabela 3. Parâmetros de simulação de ejedor para o diâmetro da garganta $\phi_t = 1,0\text{mm}$

Variável	Valor
Fluxo de massa do fluido secundário ($\dot{m}_s$)	0,39g/s
Fluxo de massa do fluido primário ($\dot{m}_p$)	1,68g/s
Temperatura correspondente para o fluxo máximo de massa do fluido secundário (T _v)	-2°C
Temperatura correspondente para o fluxo máximo de massa do fluido primário (T*)	71°C
Fluxo de massa por unidade de área através da garganta do bocal do fluido primário	2135,74kg/s.m ²
Fluxo de massa por unidade de área através da garganta hipotética do fluido secundário	179,91kg/s.m ²
Calor latente de vaporização no evaporador (10°C)	233,07 kJ/kg
Calor latente de vaporização no gerador (90°C)	191,33 kJ/kg
Razão entre a área da câmara de mistura e a área da garganta do bocal A_3/A_t	6,21
Razão entre a garganta hipotética do fluxo secundário e a área da garganta do bocal A_e/A_t	2,75
Capacidade de refrigeração	0,091 kW
Capacidade do gerador	0,310 kW

Para o sistema proposto, a capacidade do evaporador é de 91W, e conseqüentemente, para um calor latente de vaporização do R141b a 10°C de $h = 233,07 \text{ kJ/kg}$, tem-se um fluxo de fluido secundário através do evaporador de 0,39g/s e um fluxo principal de 1,68g/s. Com o coeficiente de arraste calculado, $\omega = 0,232$, sendo esperado um COP = 0,292.

A Fig. 3 mostra o ejedor fabricado em latão: (1) o bocal primário, entrada do fluxo vindo do gerador; (2) o corpo do ejedor com câmara de mistura e difusor divergente; (3) conexão de saída para o condensador; (4) conexão de entrada do fluxo secundário do evaporador.

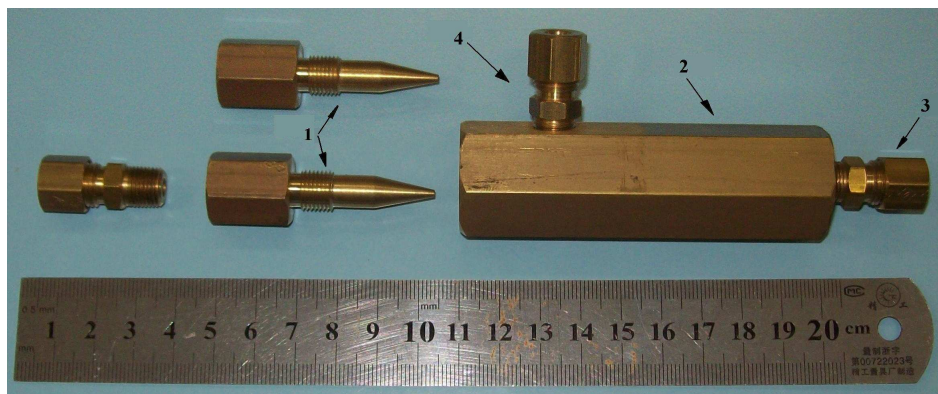


Fig 3 – Componentes do ejedor fabricado em latão

4 CONCLUSÕES

Após o projeto, manufatura e simulação do funcionamento do ejetor para o sistema de refrigeração proposto, chegou-se as seguintes conclusões:

- a) O programa desenvolvido para o dimensionamento do ejetor é uma ferramenta útil e pode ser facilmente aplicada a outros refrigerantes;
- b) O projeto modular do ejetor pode operar o dispositivo de refrigeração com outros refrigerantes pela simples troca de componentes;
- c) Nas simulações do sistema de refrigeração proposto, o ejetor operando com R141b apresentou desempenho satisfatório;
- d) Os resultados da simulação mostram que o ciclo de refrigeração proposto, pode operar com fontes de baixas temperaturas (coletor solar, regeneração dos gases de exaustão de sistemas de geração de potência ou calor rejeitado de processos industriais).

REFERÊNCIAS

- ALEXIS, G.K., KATSANIS, J.S. **Performance characteristics of a methanol ejector refrigeration unit.** *Energy Conversion and Management*, 45, 2004, 2729-2744.
- AL-KHALIDY, N. **An experimental study of an ejector cycle refrigeration machine operating on R113.** *International Journal of Refrigeration* 21, 1998, 617-625.
- APHORNRATANA, S., EAMES, I.W. **A small capacity steam-ejector refrigerator: experimental investigation of a system using ejector with movable primary zone.** *International Journal of Refrigeration* 20, 1997, 352-358.
- CIZUNGU, K., MANI, A., GROLL, M. **Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids.** *Applied Thermal Engineering* 21, 2001, 585-598.
- CHUNNANOND, K., APHORNRATANA, S. **Ejectors: applications in refrigeration technology.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 2004, 129-155.
- DORANTÉS, R., LALLEMAND, A. **Influence de la nature des fluides, purs ou en mélanges non-azéotropiques, sur les performances d'une machine de climatisation à éjecto-compresseur.** *International Journal of Refrigeration* 18, 1995, Number 1.
- HUANG, B.J., CHANG, J.M., WANG, C.P., PETRENKO, V.A. **A 1-D analysis of ejector performance.** *International Journal of Refrigeration* 22, 1999, 354-364.
- HUANG, B.J., CHANG, J.M. **Empirical correlation for ejector design.** *International Journal of Refrigeration* 22, 1999, 379-388.
- SELVARAJU, A., MANI, A. **Analysis of an ejector with environment friendly refrigerants.** *Applied Thermal Engineering* 24, 2006, 827-838.
- SUN, D.W. **Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants.** *Energy Conversion and Management* 40, 1999, 873-884.
- YAPICI, R. **Experimental investigation of performance of vapor ejector refrigeration system using refrigerant R123.** *Energy Conversion and Management* 49, 2008, 953-961.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGEM/UFRN), ao Instituto Federal da Bahia (IFBa) e a Coordenação de Apoio e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).