

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CHILLERS POR ABSORÇÃO H₂O-LiBr EM UM EDIFÍCIO

Enio Nascimento de Carvalho

UnB-Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro – Brasília-DF
enionc@yahoo.com.br

João Manoel Dias Pimenta

pimenta@unb.br

Gustavo Soares de Almeida

gustavosoares@unb.br

José de Araújo Fonseca Jr.

zkaraujo@brturbo.com.br

Resumo: Este trabalho descreve o modelamento e simulação computacional de chillers de absorção comerciais a H₂O-LiBr para aplicações em ar condicionado de edifícios comerciais. O modelamento matemático de cada um dos componentes do sistema baseia-se nos princípios clássicos da conservação de energia, junto com as correlações aplicáveis da transferência de calor e massa e equações para as propriedades da solução de H₂O-LiBr, disponíveis em trabalhos recentes. O modelo adota um conceito semi-empírico, ou seja, parâmetros característicos para cada componente do sistema são identificados através de dados dos fabricantes. Os resultados da simulação serão apresentados com uma análise da demanda de calor no gerador para a condição de operação em carga parcial nas 8760 horas do ano. Uma previsão da carga térmica anual de um edifício comercial foi obtida da simulação com o software Energy Plus, cujos resultados são usados como entrada na simulação.

Palavras-chave: refrigeração, absorção, modelamento, H₂O-LiBr.

1. INTRODUÇÃO

Questões ambientais e energéticas atuais demandam inovações em projetos de refrigeração, que tenham como pontos principais o baixo consumo energético e menor impacto ao meio ambiente. Recentemente maior importância tem sido dada ao estudo dos sistemas de refrigeração por absorção, devido às peculiaridades desses sistemas em relação aos ciclos por compressão de vapor.

Uma máquina de refrigeração por absorção é um sistema termoquímico, por isso não possui componentes móveis (com exceção das bombas necessárias) o que a torna menos susceptível à manutenção e com vida útil longa, além disso, o consumo de energia elétrica é menor, tipicamente cerca de 10 % do consumo de um equivalente sistema por compressão de vapor.

Os sistemas por absorção são também chamados de termo ativados por necessitarem de alguma fonte de calor para seu acionamento, podendo assim aproveitar fontes de calor residual proveniente de processos industriais, da queima de combustíveis fósseis ou mesmo energia solar. Essa característica em especial os torna utilizáveis em sistemas de cogeração (por mais eficiente que seja um gerador termelétrico, a maior parte da energia do combustível usado para seu acionamento, cerca de 60%, é transformado em calor e rejeitado ao meio-ambiente).

Trata-se de uma limitação física que independe do tipo de combustível (diesel, gás natural, carvão, etc.). Por esta razão, no máximo 40% da energia dos combustíveis fósseis usados em um gerador podem ser transformados em energia elétrica. Assim na co-geração pode-se economizar o combustível que seria necessário para geração de efeito refrigerante (em condicionadores de ar, refrigeradores, etc.), elevando-se a eficiência energética global em até 85%.

Outra vantagem relacionada aos sistemas por absorção está ligada à conservação do meio ambiente já que estas máquinas não empregam os CFC's ou outros fluidos refrigerantes sintéticos, que contribuam para a depleção da camada de ozônio ou para o aquecimento global. Os sistemas por absorção analisados no presente trabalho utilizam água como refrigerante e o sal brometo de lítio (LiBr) como absorvente, este são elementos que não apresentam riscos ao meio ambiente.

No entanto existem duas grandes desvantagens dos sistemas por absorção frente aos por compressão de vapor, que residem no seu relativamente reduzido coeficiente de performance (COP) que pode alcançar o valor de 1,1, isso nos equipamentos mais sofisticados de duplo efeito, enquanto nos equipamentos que utilizam o ciclo por compressão de vapor o valor do COP pode atingir até 6,0. Por outro lado, as máquinas de absorção ainda representam um investimento inicial muito superior às máquinas de refrigeração por compressão de vapor, custam cerca de 67% mais caras.

Altamente difundida em países asiáticos, Europa e Estados Unidos, a refrigeração por absorção movida a gás natural tem sua utilização crescente nos últimos anos no Brasil. O aumento na utilização desse sistema ocorre em função do acréscimo na oferta de gás natural pelas concessionárias, em virtude das políticas de incentivo ao uso deste energético e à necessidade de diversificação da matriz energética brasileira.

A aplicação de gás natural em refrigeração no Brasil, ainda se concentra nos grandes centros: São Paulo e Rio de Janeiro, especialmente no Rio de Janeiro onde existem atualmente cerca de 28 mil TR em sistemas de refrigeração por absorção movidos a gás natural instalados, o que corresponde a cerca de 35% do potencial instalado, essa participação deverá crescer, segundo especialistas na área, à medida que sejam reduzidos subsídios que tornam artificialmente mais barata a energia elétrica no País em relação ao gás natural.

Em virtude da já citada necessidade de diversificação da matriz energética brasileira, o País deverá ampliar a rede de distribuição de gás natural em seu território, o que acabará por expandir o terreno de aplicação da refrigeração por absorção, tanto na co-geração, quanto no aproveitamento de calor residual de processos industriais e mesmo nos sistemas por queima direta de combustível. Ocorre então a necessidade de pesquisas na área de absorção, orientadas ao aumento do desempenho destas máquinas e ao melhor aproveitamento energético que tornará a utilização da refrigeração por absorção mais viável do ponto de vista econômico e ambientalmente amigável.

2. ESTADO DA ARTE

O princípio de utilização do ciclo por absorção na geração de frio data por volta do ano 1700. Sabia-se que gelo poderia ser produzido pela evaporação de água pura de um recipiente ligado a outro com ácido sulfúrico. Como o ácido absorvia vapor d'água, causando uma redução de temperatura, camadas de gelo eram então formadas na superfície da água.

Em 1859, Ferdinand Carre introduziu uma nova máquina usando o par água/amônia como fluido de trabalho. Esta máquina foi patenteada nos EUA em 1860 e máquinas baseadas nesta patente foram usadas para fabricar gelo e estocar alimentos.

Em 1950, um sistema usando brometo de lítio e água como fluido de trabalho foi introduzido para aplicação industrial. Poucos anos depois, um sistema de duplo efeito foi produzido e tem sido usado como padrão industrial para ciclos de refrigeração por absorção de alta performance.

Importantes trabalhos tem sido publicados nos últimos anos com respeito a aplicação dos sistemas por absorção. Agnew e Talbi (1998) realizaram uma simulação do ciclo combinado Diesel-absorção, utilizando o calor proveniente dos gases de combustão em um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito, prevendo um COP (coeficiente de performance) da ordem de 0,8. Nesse estudo o efeito refrigerante foi utilizado para melhorar o desempenho do turbo-compressor de um motor diesel, aumentando a eficiência do motor, reduzindo conseqüentemente o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Arun, et al. (2000) realizaram estudo da performance de um sistema por absorção de duplo efeito com LiBr. Os estudos mostraram que o sistema a duplo efeito contribui para melhorar a performance do ciclo e superar a questão de inabilitação dos ciclo de simples efeito em fazer uso de fontes de alta temperatura. O artigo faz ainda uma comparação entre os sistemas de duplo efeito com fluxo em série e em paralelo, e revela que o COP para fluxo em paralelo é maior que o para o sistema em série. Comparado ao sistema com fluxo em série, o coeficiente de performance do sistema com fluxo em paralelo se mostrou mais sensível à variação de temperatura no evaporador e menos sensível à variação de temperatura no condensador e absorvedor.

Glebov e Setterwall (2001) desenvolveram um estudo sobre a influência do aditivo para transferência de calor 2-metil-1pentanol (2MP) no desempenho do efeito refrigeração de um pequeno chiller por absorção. Os pesquisadores realizaram duas séries experimentais, em uma das quais o aditivo foi injetado na solução de água/LiBr. A taxa de melhora da capacidade de refrigeração para um nível ótimo de concentração de aditivo foi de 20%. Na Segunda série experimental o aditivo foi injetado no refrigerante, a taxa de melhora tornou-se 32%, que é substancialmente melhor. Este novo aditivo tem sido usado para aumentar a capacidade de chillers de absorção comercial. A capacidade tem sido aumentada por um fator de 30-35% que está em muito bom acordo com os dados do experimento.

Martinez e Pinazo (2001) desenvolveram um método estatístico que foi empregado com a disposição de melhorar o projeto de um chiller utilizando água-brometo de lítio a simples efeito. Projetos experimentais e diferentes análises foram usadas para medir os efeitos da variação das áreas dos trocadores de calor na performance de uma máquina de absorção, as conclusões extraídas deste estudo permitiram uma redistribuição da transferência total de calor entre os trocadores de calor, que possibilitariam uma melhora no COP em quase 10%, sem variar a capacidade nominal do sistema nem a área total de transferência de calor.

Park, et al. (2004) analisaram o desempenho característico de um chiller de refrigeração por absorção com capacidade de 210 TR, em operação com carga parcial e calcularam o consumo médio de energia. O efeito da variação da vazão e temperatura da água de arrefecimento do absorvedor e condensador, na performance e economia de energia foram quantificados durante a operação com carga parcial. Concluíram que o desempenho de um sistema por absorção é mais sensível às mudanças de temperatura que a variação da vazão da água de arrefecimento do absorvedor e condensador. Se a vazão de água é reduzida de 60% do valor padrão a capacidade de resfriamento é recuperada reduzindo-se a temperatura da água em 2 °C.

Mehrabian e shahbeik (2004) desenvolveram um programa computacional para projeto e análise termodinâmica de um chiller por absorção de simples efeito, utilizando o par H₂O-LiBr como fluido de trabalho. Os resultados calculados pelo programa foram usados no estudo do efeito dos parâmetros de entrada na geometria, no desempenho do ciclo e na eficiência de acordo com a segunda lei da Termodinâmica. Aumentando-se a temperatura no evaporador e gerador ou reduzindo-se as temperaturas no condensador e gerador pode-se melhorar a eficiência do ciclo de acordo com a segunda lei da Termodinâmica.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Aspectos Gerais

Para que se possa desenvolver a simulação e modelagem matemática do ciclo por absorção (Fig. 1) acima algumas hipóteses simplificadoras deverão ser assumidas:

- o estado regular do refrigerante corresponde ao da água pura;
- não há variação de pressão, exceto nos dispositivos de expansão e na bomba;
- nos pontos 8,2,4 da figura 1, há somente líquido saturado;
- no ponto 6 da figura 1 há somente vapor saturado;
- os dispositivos de expansão são adiabáticos;
- não há troca de calor nas superfícies e tubulações, exceto nos trocadores de calor.

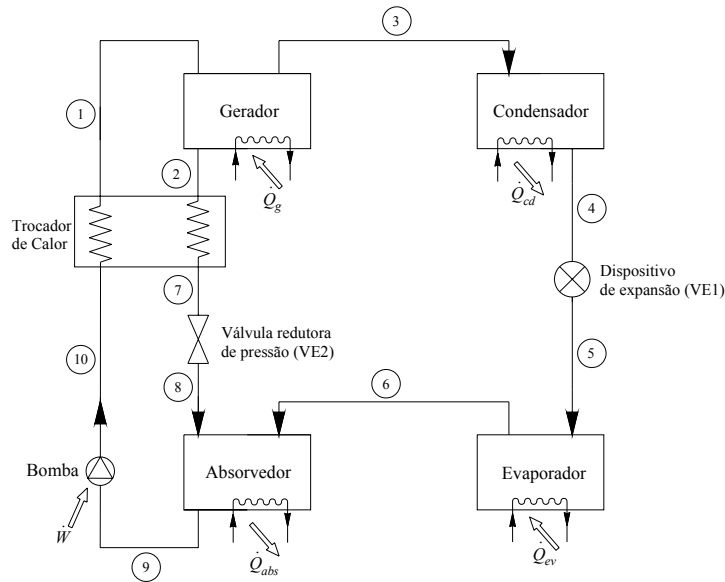


Figura 1 – Sistema de refrigeração a ser simulado.

2.2 Modelagem dos componentes

2.2.1 Absorvedor

No absorvedor ocorrem basicamente dois processos a transferência de calor e a transferência de massa. Para a modelagem matemática desses dois fenômenos, simplificaremos o processo utilizando-se o princípio da superposição de efeitos para tal dividiremos o processo em dois distintos, a saber: a absorção (mistura adiabática de dois fluxos) de vapor pela solução e a troca de calor.

Utilizando-se os princípios da conservação de massa e energia, aplicados ao absorvedor, sabendo-se que: $\dot{m}_1$ é a vazão mássica de solução no ponto (1), $\dot{m}_a$ é a vazão mássica de água no absorvedor, h é a entalpia, X a concentração da solução e $\dot{Q}$ é o fluxo de calor em cada componente do sistema, tem-se:

$$\dot{m}_1 \cdot X_1 = \dot{m}_2 \cdot X_2 \quad (1)$$

$$\dot{m}_3 \cdot h_6 + \dot{m}_2 \cdot h_8 = \dot{m}_1 \cdot h_9 + \dot{Q}_{abs} \quad (2)$$

$$\dot{m}_a \cdot h_{a1} + \dot{Q}_{abs} = \dot{m}_a \cdot h_{a2} \quad (3)$$

2.2.2 Gerador

No gerador ocorre a absorção de calor que pode ser por fonte direta ou indireta (no caso de aproveitamento de calor residual). Este calor é transferido à solução de água/LiBr, fazendo com que parte da água desta solução se torne em estado de vapor que flui ao condensador. A outra parte da solução a uma alta concentração de LiBr escoar para o absorvedor.

Neste caso tem-se um processo de transferência de massa que ocorre na vaporização da água (considerada pura) e a transferência de calor que ocorre no trocador. Na figura 2 tem-se uma representação esquemática do gerador, onde: h_1 é a entalpia no ponto (1), T_1 é a temperatura no ponto (1) e P_{alta} é a pressão no gerador.

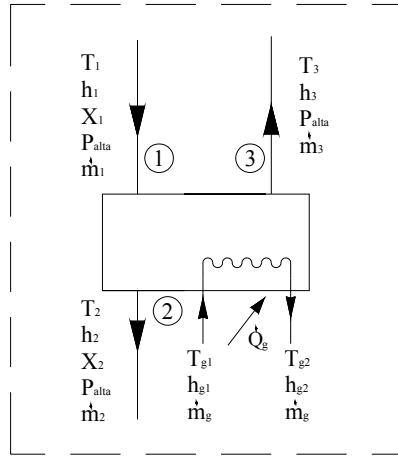


Figura 2 – Representação esquemática do Gerador

Utilizando-se os princípios de conservação de massa e energia no gerador (Fig. 2), vem:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{Q}_g = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (4)$$

$$\dot{m}_g \cdot h_{g1} = \dot{m}_g \cdot h_{g2} + \dot{Q}_g \quad (5)$$

e, com o método da média logarítmica das diferenças de temperatura para o gerador, temos:

$$\dot{Q}_g = U_g \cdot A_g \cdot \Delta T_{m_g} \quad (6)$$

$$\Delta T_{m_g} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (7)$$

$$\Delta T_1 = T_{g1} - T_2 \quad (8)$$

$$\Delta T_2 = T_{g2} - T_1 \quad (9)$$

2.2.3 Trocador de Calor

Pode-se ainda fazer uso de um trocador de calor entre o gerador e absorvedor com o objetivo de melhorar o coeficiente de performance do ciclo por absorção. A transferência de calor ocorre entre o fluido quente que sai do gerador e o fluido frio que sai do absorvedor para o gerador (Fig. 3).

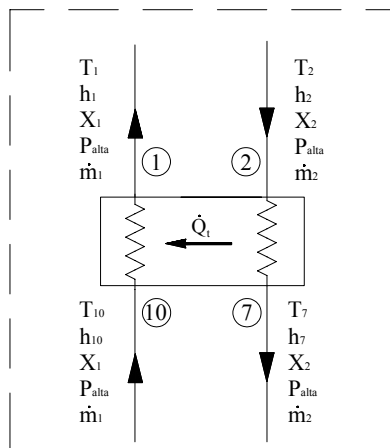


Figura 3 – Representação esquemática do Trocador de Calor

Mais uma vez faz-se um balanço utilizando-se a conservação de massa e energia e a média logarítmica das diferenças de temperatura, considerando o trocador de calor em escoamento contra corrente, onde, ΔT_{m_t} é a já citada média logarítmica das diferenças de temperatura, U é o coeficiente global de transferência de calor no trocador.

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_2 \cdot h_7 + \dot{Q}_t \quad (10)$$

$$\dot{m}_1 \cdot h_{10} + \dot{Q}_t = \dot{m}_1 \cdot h_1 \quad (11)$$

$$\dot{Q}_t = U_t \cdot A_t \cdot \Delta T_{m_t} \quad (12)$$

Dados experimentais mostram que a região do ciclo onde existe o maior risco de acontecer o problema da cristalização, é na tubulação de saída do trocador de calor (ponto 7 da figura 3), isso ocorre devido a alta concentração da solução nesta região. Para se evitar a cristalização e uma conseqüente interrupção no ciclo, deve-se calcular uma entalpia mínima no ponto (7) para que não ocorra a cristalização. Para tanto utiliza-se a relação abaixo (ASHRAE, 1993):

$$h_{\min} = -1397 + 24 \cdot X \quad (13)$$

2.2.4 Condensador

No condensador o vapor de água proveniente do gerador a alta pressão, perde calor no trocador, sendo então condensado. O vapor que adentra o condensador sai na forma de líquido saturado (Fig. 4). Fazendo-se um balanço de energia no condensador têm-se:

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_3 \cdot h_4 + \dot{Q}_{cd} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{cd} \cdot h_{cd1} + \dot{Q}_{cd} = \dot{m}_{cd} \cdot h_{cd2} \quad (15)$$

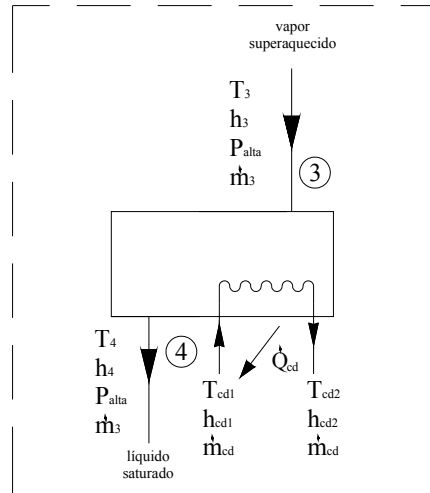


Figura 4 – Representação esquemática do Condensador

Para uma análise da troca de calor no condensador emprega-se o método da Efetividade-NUT. A efetividade (ε) é obtida por equação apropriada (Incropera et al, 1998), a partir das dimensões do trocador de calor, das vazões, do valor de NUT (número de unidades de transferência) e ainda de C_r ($C_r = C_{\min} / C_{\max}$). Abaixo temos a representação das equações envolvidas na análise:

$$\varepsilon_{cd} = 1 - e^{(-NUT_{cd})} \quad (16)$$

$$C_{\min_{cd}} = \dot{m}_{cd} \cdot c_{p,a} \quad (17)$$

$$NUT_{cd} = \frac{U_{cd} A_{cd}}{C_{\min_{cd}}} \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{\max_{cd}} = C_{\min_{cd}} \cdot (T_4 - T_{cd1}) \quad (19)$$

A utilidade real da efetividade é que, conhecido T_4 , T_{cd1} e ε_{cd} podemos calcular a taxa real de transferência de calor, através da expressão:

$$\dot{Q}_{cd} = \varepsilon_c \cdot \dot{Q}_{\max_{cd}} \quad (20)$$

2.2.5 Evaporador

O fluido refrigerante (água) após ser expandido no dispositivo de expansão onde, após uma abrupta queda de pressão, se dirige para o evaporador na forma de vapor e uma parte de água líquida. No evaporador ocorrerá troca de calor com um agente refrigerante, saindo a água no estado de vapor saturado para o absorvedor (Fig. 5). Fazendo-se um balanço de energia no evaporador :

$$\dot{m}_3 \cdot h_5 + \dot{Q}_{ev} = \dot{m}_3 \cdot h_6 \quad (21)$$

$$\dot{m}_{ev} \cdot h_{ev1} = \dot{m}_{ev} \cdot h_{ev2} + \dot{Q}_{ev} \quad (22)$$

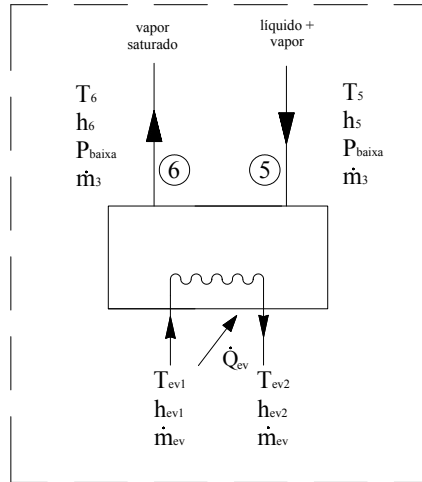


Figura 5 – Representação esquemática do Evaporador

Mais uma vez para uma análise do desempenho da troca de calor no evaporador, utiliza-se o método Efetividade-NUT, e equações similares as já utilizadas no caso do condensador.

$$\varepsilon_{ev} = 1 - e^{(-NUT_{ev})} \quad (23)$$

$$C_{\min_{ev}} = \dot{m}_{ev} \cdot C_{p,a} \quad (24)$$

$$NUT_{ev} = \frac{U_{ev} A_{ev}}{C_{\min_{ev}}} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{\max_{ev}} = C_{\min_{ev}} \cdot (T_{ev1} - T_5) \quad (26)$$

$$\dot{Q}_{ev} = \varepsilon_{ev} \cdot \dot{Q}_{\max_{ev}} \quad (27)$$

3. METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO

O trabalho considera inicialmente uma revisão da bibliografia a respeito do assunto, onde verifica-se as aplicabilidades em suas várias configurações, além de sua importância no atual contexto da indústria de refrigeração. Em seguida efetuou-se uma revisão dos conceitos teóricos relacionados ao ciclo de refrigeração por absorção.

Após a fase de estudo da teoria aplicada, foram definidos os principais objetivos a serem alcançados no trabalho, adotando-se para tal as seguintes etapas :

Modelamento matemático do ciclo de absorção de simples efeito utilizando-se das correlações da transferência de calor e massa aplicáveis ao sistema, seguido da simulação computacional do ciclo por absorção.

Na simulação será utilizado programa em linguagem Fortran 77 na execução do modelo matemático apresentado e ainda o software DOE Energy Plus no cálculo da carga térmica para as 8760 horas do ano em um edifício comercial.

A Figura 6 mostra o fluxo de entrada e saída de dados no programa, os dados de entrada serão utilizados nas correlações aplicáveis da transferência de calor e massa e equações da conservação de energia, sendo os resultados de saída aproximados através do método iterativo de Newton-Raphson.

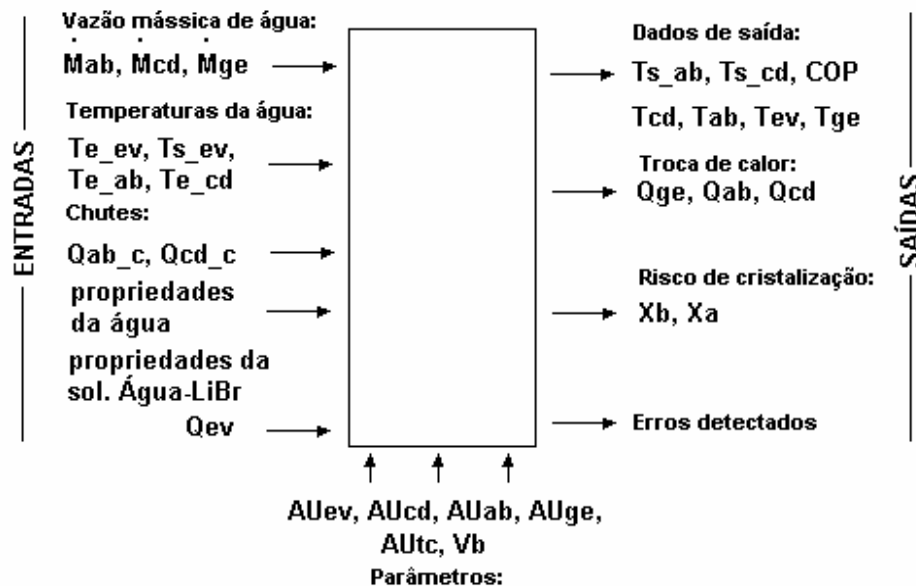


Figura 6: Diagrama de fluxo do programa

Uma análise de dados será feita com base nos resultados obtidos e comparando-se estes dados com uma simulação no programa ABSIM em EES-Engineering Equation Solver (F-CHART, 2001).

A Figura 7 mostra as plantas baixas dos dois pavimentos do prédio para o qual será feita a simulação. Tal prédio abrigará as futuras instalações do Núcleo de Tecnologia da Informação (NTI) e Centro de Processamento de Dados (CPD) da Universidade de Brasília (UnB).

A Figura 8 mostra a variação da carga térmica para 8760 horas do ano em um edifício, os dados de carga térmica serão utilizados como dados de entrada na simulação computacional.

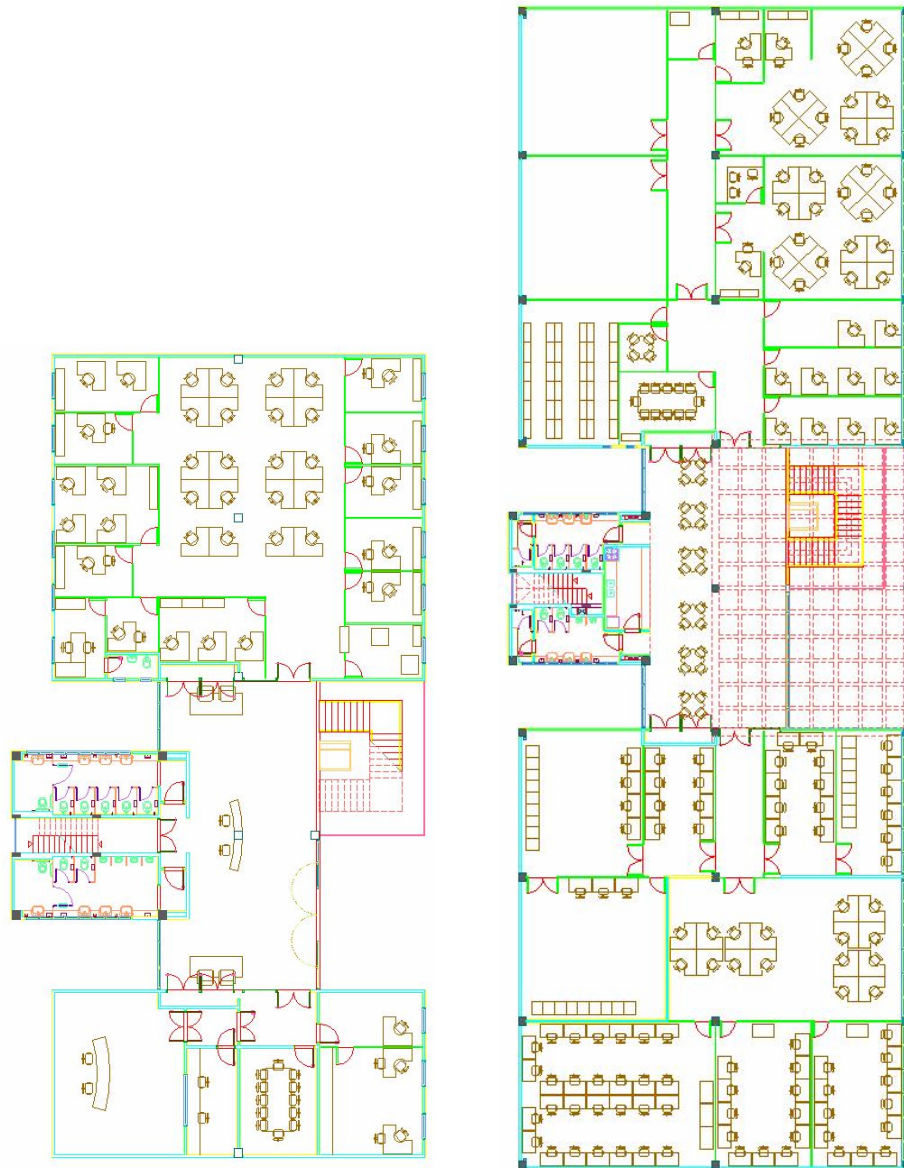


Figura 7: Plantas baixas do prédio do NTI/CPD da UnB (esquerda: pavimento térreo)

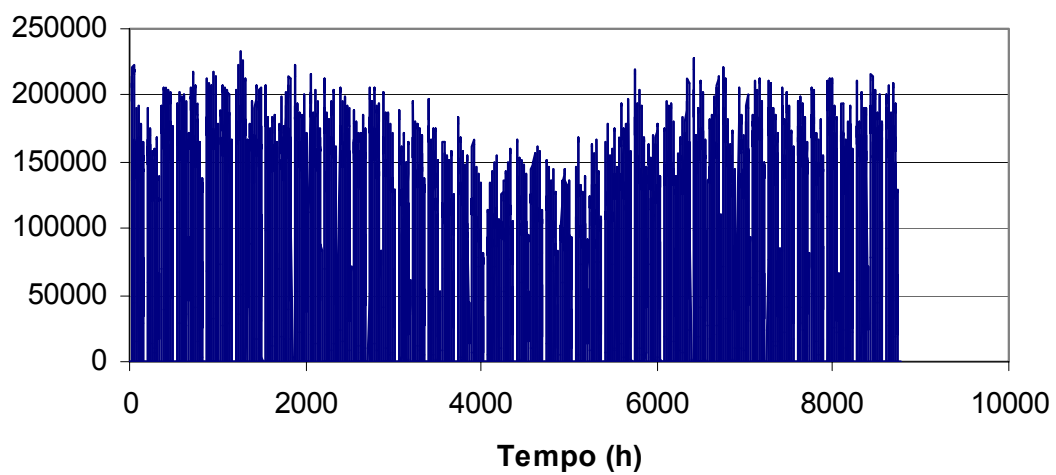


Figura 8: Gráfico da carga térmica de um ano

4. CONCLUSÕES

O modelo matemático apresentado por ser semi-empírico depende de dados de operação do chiller de refrigeração por absorção, para cálculo dos coeficientes globais nos trocadores de calor da máquina, o que acaba por tornar a simulação mais próxima da realidade, mais ao mesmo tempo ocorre a dificuldade de se obter tais dados que nem sempre são acessíveis.

O modelo matemático ainda se mostrou de fácil implementação, devido à simplicidade das equações envolvidas, o que acaba por tornar menor o trabalho computacional e consequentemente maior rapidez na obtenção dos dados.

Os resultados obtidos nesta simulação contribuirão para uma avaliação econômica mais eficaz e próxima da realidade, na definição da escolha de utilização entre os sistemas por compressão de vapor e os sistemas por absorção ou mesmo em plantas mistas. Além disso os dados obtidos nesta simulação poderão influenciar positivamente na economia de energia e melhora do desempenho dos sistemas de refrigeração por absorção comerciais.

5. REFERÊNCIAS

- Arun, M.B., Maiya, M.P., Murthy, s.s., 2001, “Performance comparison of double-effect parallel-flow and series flow water-lithium bromide absorption systems”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, p.p 1273–1279.
- DOE, Department of Energy, EnergyPlus: Weather Data Sources, 2005, http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.html.
- EES, “Engineering Equation Solver”, 1992-2001, F-Chart Software, Maddington, Wisconsin.
- Glebov, D., Setterwall, F., 2002, “Experimental study of heat transfer additive influence on the absorption chiller performance”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, p.p 538–545.
- Martinez, p.j., pinazo, j.m., 2002, “A method for design analysis of absorption machines”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, p.p 634–639.
- Mehrabian, M. A., Shabeik, A. E., 2004, “Thermodynamic modelling of a single-effect LiBr-H₂O absorption refrigeration cycle”, *Proquest science Journals*, pp 261-273.
- Park, C.W., Cho, H.C., Kang, y.t., 2004, “The effect of heat transfer additive and surface roughness of micro-scale hatched tubes on absorption performance”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, p.p 264–270.
- Park, C.W., Jeong, J. H., Kang, Y. T., 2004, “Energy consumption characteristics of an absorption chiller during the partial load operation”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, p.p 948–954.
- Talbi, M., Agnew, B., 2002, “Energy recovery from diesel engine exhaust gases for performance enhancement and air conditioning”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, p.p 693–702.

MODELLING AND SIMULATION OF AN H₂O-LiBr ABSORPTION CHILLER IN A BUILDING.

Enio Nascimento de Carvalho

UnB-Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro – Brasília-DF
enionc@yahoo.com.br

João Manoel Dias Pimenta

pimenta@unb.br

Gustavo Soares de Almeida

gustavosoares@unb.br

José de Araújo Fonseca Jr.

zkaraujo@brturbo.com.br

Abstract: *This work describes the modeling of an H₂O-LiBr absorption chiller of commercial buildings. The mathematical model of each one of the components of the system was adopted based on the classic principles of the energy conservation, using applicable correlations of the heat transference and mass and equations that describe the properties of the solution of H₂O-LiBr available in works published recently. The model adopts a semi-empirical concept. Characteristic parameters for each component of the system are identified through data of the manufacturers. The results of the simulation will be presented with an analysis of the demand of heat in the generator in partial load in the 8760 hours of the year. A forecast of the annual thermal load of a commercial building was gotten by simulation with software DOE Energy Plus, being the results used as entrance data in the simulation of the absorption chiller.*

Keywords: *refrigeration, absorption, modelling, H₂O-LiBr.*