

3 Solução

Usando os modelos matemáticos apresentados no capítulo 2 para cada componente do sistema e para o sistema global, foram elaborados os algoritmos e os programas de cálculo para simular o comportamento do sistema global de refrigeração para condicionamento de ar em edifícios.

A primeira etapa consistiu na obtenção dos parâmetros característicos do chiller que permitam reproduzir seu comportamento e assim obter sua curva característica a cargas parciais. Neste trabalho usamos um chiller adequado a carga térmica máxima da PUC-Rio da marca TRANE (apêndice 7.3).

Obtidas as características do chiller foram fixadas para estudar o caso quando o chiller acompanha a carga (caso 1).

Em seguida, incorporam-se às equações do modelo do tanque de armazenamento para resolver os casos de termoacumulação, quando o chiller fica ligado ou desligado no período de ponta (casos 2 ou 3, respectivamente).

Como a energia consumida pelo chiller operando com termoacumulação depende da capacidade e da eficiência do tanque de armazenamento, elaborou-se um algoritmo geral para determinar esses parâmetros, e, assim, obter, os custos dos consumos de energia nos casos 2 e 3, que permitam fazer uma análise econômica comparativa dos três casos.

Os algoritmos desenvolvidos para os casos 2 e 3 consideraram os diferentes modos de operação do sistema, para atender à variação horária da carga térmica e da temperatura com termoacumulação, determinando, em cada caso, a energia consumida pelo chiller.

Já que o modelo do sistema global está composto por um sistema de equações não lineares, usamos o software EES (“Engineering Equation Solver” - fchart software), que resolve o sistema de equações e permite determinar facilmente as propriedades termodinâmicas de substâncias como R-22, água, e misturas como o ar ambiente, assim como outros parâmetros, que foram usados neste trabalho.

Igualmente, o EES muito contribui na apresentação dos resultados, já que de início verifica quantas e quais são as variáveis do sistema; antes de obter sua solução apresenta os erros de sintaxes (se existirem). Quando se executa o programa, mostra também os erros de convergência (se existirem), oferecendo sugestões para o ajuste dos valores iniciais de cada uma das variáveis envolvidas no sistema, tornando, deste modo, muito fácil e rápida a construção de tabelas de dados de entrada e saída.

O software EES usa, como método de solução de sistemas não lineares, o método de Newton-Raphson para múltiplas variáveis.

3.1. Algoritmos de Solução

O primeiro dos algoritmos (**algoritmo N° 1**) é desenvolvido para obter um modelo de simulação de um chiller tipo parafuso resfriado por água, adequado à distribuição de carga do prédio. Neste algoritmo incluem-se as equações dos modelos do evaporador, do condensador, do compressor, da válvula de expansão e da torre de resfriamento, apresentados no capítulo 2, os quais são organizados em forma seqüencial, de acordo com o ciclo de compressão de vapor.

Portanto, com este algoritmo obter-se-ão os parâmetros característicos do chiller, que o fabricante não apresenta em seus catálogos, quando este opera a plena carga e a carga parcial.

Determinados os parâmetros característicos do chiller e considerando uma eficiência da torre de resfriamento igual a 60% (Goribar, 1973), o algoritmo N° 1 é usado para obter o consumo de energia quando **o chiller acompanha a carga**. Baseado neste algoritmo elaboram-se **os programas N° 1.1 e N° 1.2** (ver listagem 7.5.1, 7.5.2).

Para os casos em que o chiller opera com um tanque de armazenamento, elabora-se um segundo algoritmo geral (**algoritmo N° 2**), que inclui os quatro modos de operação descritos no capítulo 2 (com termoacumulação), os quais se diferenciam pelo período de operação e pela razão entre carga térmica horária e a capacidade do chiller. Baseado neste algoritmo elaboram-se os programas números 2.1, 2.2, 2.3.(ver listagem 7.5.3, 7.5.4, 7.5.5).

O terceiro algoritmo (**algoritmo N° 3**) é feito para determinar a capacidade do chiller em função da eficiência do tanque (caso 1 e 2), já que esta capacidade, é

um dado de entrada nos modos de operação 1, 3 e 4, elabora-se o programa N° 3 que permite determinar a capacidade do chiller levando em conta a eficiência do tanque de armazenamento (ver listagem 7.5.6).

3.1.1. Algoritmo N° 1

Os passos adotados para simular o comportamento do sistema são os seguintes:

1) São fornecidos os dados da carga térmica do prédio e as condições do meio ambiente do dia de projeto (condições críticas), como a temperatura e umidade específica média do ar.

2) São fornecidos os parâmetros de operação do chiller à carga nominal (consumo E_o e capacidade Q_o), assim como: a temperatura da água na entrada do condensador (T_{15}), a temperatura na saída do evaporador do chiller, a vazão mássica da água na entrada do evaporador \dot{m}_a e a vazão mássica na entrada do condensador \dot{m}_c do chiller e o ΔT de sub-resfriamento no condensador.

3) São fornecidos os parâmetros característicos do chiller: eficiências do compressor, as efetividades do evaporador e do condensador e, o grau de superaquecimento; fazendo um ajuste determina-se a condutância térmica global UA de cada trocador de calor. Para obter o consumo de energia no caso 1, todos os valores referidos aqui são fixados.

4) Escrevem-se as equações dos modelos de cada componente do chiller e da torre de resfriamento:

a) para o evaporador as equações são: (2.25), (2.26), (2.27) e (2.28),

b) para o compressor, as equações: (2.29), (2.30) e (2.31),

c) para o condensador: (2.32), (2.33), (2.34) e (2.35),

d) e para a válvula de expansão termostática: (2.36) e (2.37).

5) Escreve-se a equação do balanço de energia no chiller: equação (2.79)

6) Escreve-se a equação de balanço de energia global do sistema (2.80).

7) Escreve-se a equação do modelo da torre de resfriamento: equação (2.77)

8) Escreve-se a equação do COP, equação: (2.85).

9) Verifica-se se o número das equações é igual ao número de incógnitas.

10) Define-se o número de iterações e se estabelece a tolerância de convergência das variáveis.

11) Executa-se o programa, para um conjunto de dados composto por uma carga térmica e uma temperatura ambiente, correspondentes a uma faixa horária.

12) Repete-se o procedimento descrito no ponto anterior (11), para outro conjunto de dados, entre as sete e 23 horas.

13) No caso da determinação dos parâmetros do chiller, elaboram-se os resultados em tabelas ou gráficas, para estudar o comportamento dos parâmetros e do sistema em geral. Em outros, casos determina-se somente o consumo de energia.

3.1.2. Algoritmo N° 2

Aqui se apresenta um algoritmo que envolve os quatro modos de operação, que servirá para construir os programas números 2.1, 2.2 e 2.3. Os passos a seguir são:

1) São fornecidos os dados da carga térmica do prédio e as condições do meio ambiente do dia de projeto (condições críticas), como a temperatura do meio ambiente e umidade específica média do ar.

2) São fornecidos os parâmetros de operação do chiller obtidos com o algoritmo N° 1. Assim temos: a temperatura na saída do evaporador do chiller, as vazões mássicas da água na entrada do evaporador e do condensador do chiller como uma função da carga, o ΔT de sub-resfriamento, as eficiências do compressor, as condutâncias térmicas globais (UA) do evaporador e do condensador, o grau de superaquecimento controlado pela válvula de expansão, e para uma eficiência da torre de resfriamento de 60%. Todos estes valores são mantidos fixos.

3) Repetem-se os passos 4a, 4b, 4c, 4d do algoritmo anterior.

4) Escreve-se a equação do balanço de energia global, de acordo com o modo de operação. Assim temos:

a) Para o modo 1 a equação é: (2.81),

b) Para o modo 2: (2.82),

c) Para o modo 3: (2.83),

- d) Para o modo 4: (2.84).
- 5) Escreve-se a equação do balanço de energia no chiller: equação (2.79)
- 6) Escreve-se a equação da torre de resfriamento: equação (2.77).
- 7) Escrevem-se as equações de balanço de massa e energia no tanque e nas tubulações conexas ao tanque. Assim temos:
 - a) Para o modo 1, temos que, as equações são: (2.38), (2.39), (2.40), (2.41), (2.42), (2.43), (2.44), (2.45).
 - b) Para o modo 2 : (2.46), (2.47), (2.48), (2.49), (2.50), (2.51), (2.52), (2.53).
 - c) Para o modo 3: (2.54), (2.55), (2.56), (2.57), (2.58), (2.59).
 - d) Para o modo 4: (2.60), (2.61), (2.62), (2.63), (2.64), (2.65), (2.66), (2.67).
- 8) Escreve-se a equação de balanço de energia nos fan-coils, equação (2.78) (somente para os modos 1, 2 e 4).
- 9) Calcula-se o COP: equação: (2.85).
- 10) Verifica-se se o número das equações é igual ao número de incógnitas.
- 11) Define-se o número de iterações e estabelece-se a tolerância das Variáveis.
- 12) Executa-se o programa, para um conjunto de dados composto por uma carga térmica e uma temperatura ambiente, correspondentes a uma faixa horária. Obtendo-se, como dado de saída, o consumo de energia.
- 13) Organizam-se os resultados em tabelas, tais como consumo de energia vs.tempo.

3.1.3. Algoritmo N° 3

Este algoritmo permite calcular a capacidade do chiller, nos casos 2 e 3, e capacidade do tanque de armazenamento, em função da eficiência do tanque de armazenamento. Com este algoritmo se elabora o programa N° 3. Os passos a seguir são:

- 1) Estima-se uma eficiência de tanque de armazenamento n_{st}
- 2) Fornece-se a carga térmica horária do prédio.

- 3) Integra-se a carga térmica (soma de todas as cargas)
- 4) Fornecem-se as temperaturas de entrada e saída do tanque de armazenamento no processo de carga $T_6 = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{11} = 11^\circ\text{C}$ respectivamente.
- 5) Fornece-se uma T_{\max} , definida por Homan et al. (1996).
- 6) Fornece-se a razão altura / diâmetro do tanque (H/D).
- 7) Calcula-se a energia total diária requerida E_1 .
- 8) Calcula-se a capacidade do chiller CAP_{ch} com E_1 e a eficiência do tanque de armazenamento n_{st} .
- 9) Calcula-se a eficiência do tanque de armazenamento, n_{st} , empregando as equações (2.69), (2.71), (2.72), (2.73), (2.74), (2.75) e (2.76).
- 10) Comparam-se os valores de n_{st} assumido e calculado.
- 11) Repete-se o procedimento anterior até que a diferença dos valores de n_{st} assumido e calculado seja menor que 1 %.
- 12) Cumprida a condição anterior (11), obtém-se a capacidade do chiller para cada um dos casos, quando o chiller fica ligado ou não nas horas de ponta.

3.2. Dados de entrada do modelo

Existem algumas considerações importantes na aplicação do modelo, as quais apresentamos a seguir.

3.2.1. Dados de entrada comuns

Nos algoritmos descritos consideram-se como dados de entrada, a carga térmica \dot{Q}_T e variações de temperatura, ao longo de um “dia típico”.

Dentre as condições ambientais, a umidade absoluta, w , é um dado importante no desenvolvimento do modelo. Esta não varia ao longo do dia, muito, embora, para a simulação, usaremos um valor médio histórico.

A temperatura da água na entrada do condensador, T_{15} , é obtida dos catálogos de fabricantes como TRANE, BITZER, etc. No presente trabalho usamos um compressor marca TRANE, com a vazão mássica da água no

evaporador \dot{m}_a e a vazão mássica no condensador \dot{m}_c para uma velocidade de rotação do compressor constante ($N = 3500$ rpm).

As condições do meio ambiente são determinadas considerando a pressão atmosférica do local (Rio de Janeiro), o histórico das temperaturas de bulbo seco e a umidade relativa média do dia típico.

A eficiência elétrica, η_e , do motor do compressor e a eficiência da torre de resfriamento são mantidas constantes em todos os casos.

3.2.2.

Análise de sensibilidade dos parâmetros do compressor

Como, de início, não se dispõe de todos os parâmetros do chiller, faz-se necessária uma análise de sensibilidade destes, procurando que sua capacidade e seu consumo do modelo fiquem o mais próximos às condições nominais fornecidas pelo fabricante. Assim, também a temperatura de descarga T_2 do compressor não deverá ultrapassar 80 °C e a eficiência do compressor “n”, ficará entre $0,7$ e $0,90$ (Rodrigues,1996).

Os parâmetros a determinar são: a condutância térmica global do condensador UA_{cd} e do evaporador UA_{ev} , as eficiências adiabática η_k e mecânica η_m do compressor, considerando uma eficiência da torre de resfriamento $\eta_{torre} = 0,60$ (Goribar, 1973).

3.2.3.

Dados de entrada para obter os parâmetros característicos do chiller

Considerando que somente neste caso a carga térmica é constante e igual à capacidade nominal do chiller, os dados de entrada são classificados em:

a) Dados constantes

Capacidade nominal do chiller: $Cap_{ch} = 704$ kW (TRANE)

Temperatura ambiente: $T_{amb} = 35$ °C (ARI,550/590)

Temperatura da água na saída do evaporador: $T_5 = 7,2$ °C (TRANE)

Temperatura da água na entrada do condensador: $T_{15} = 29,4$ °C (TRANE)

Vazão mássica da água no evaporador: $\dot{m}_a = 25,23$ (kg/s) (TRANE)

Vazão mássica da água no condensador $\dot{m}_c = 37,85$ (kg/s) (TRANE)

ΔT de subresfriamento : $DT_{sub} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

ΔT de superaquecimento : $DT_{vet} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Eficiência elétrica do motor do compressor $\eta_e = 0,98$ (assumida)

Pressão atmosférica: $P_{amb} = 100$ (kPa) (Rio de Janeiro).

Umidade relativa média da cidade-historico: $w_{amb} = 0,01565$ (kg-água / kg-ar seco), (dados obtidos de: [dailyHistory.html](#))

Calor específico médio da água no evaporador: $c_{p_{ae}} = 4,2$ (kJ/kg-K)

Calor específico médio da água no condensador: $c_{p_{ac}} = 4,2$ (kJ/kg-K)

b) Valores iniciais:

Eficiência isentrópica ou adiabática de compressor: ($0 < \eta_k < 1$)

Eficiência mecânica do compressor: ($0 < \eta_m < 1$)

Efetividade do evaporador nominal: ($0 < \varepsilon_{ev} < 1$)

Efetividade do condensador nominal: ($0 < \varepsilon_{cd} < 1$)

3.2.4.

Dados de entrada - caso 1

Os dados de entrada são classificados em dois tipos, assim temos:

a) Dados variáveis ao longo do dia:

Temperatura ambiente: T_{amb} (Anexo 7.1)

Carga térmica do prédio: \dot{Q}_T (Anexo 7.2)

b) Dados constantes:

Temperatura da água na saída do evaporador : T_5

ΔT de subresfriamento : DT_{sub}

ΔT de superaquecimento : DT_{vet}

Eficiência da torre de resfriamento : ε_{torre}

Vazão mássica da água no evaporador : \dot{m}_a

Vazão mássica da água no condensador : \dot{m}_c

Eficiência elétrica do motor do compressor : η_e

Pressão atmosférica	:	P_{amb}
Umidade relativa media da cidade-historico	:	w_{amb}
Calor específico médio da água no evaporador	:	$c_{p_{ae}}$
Calor específico médio da água no condensador	:	$c_{p_{ac}}$
Eficiência isentrópica ou adiabática de compressor:		η_k
Eficiência mecânica do compressor	:	η_m
Condutância térmica global do condensador	:	UA_{cd}
Condutância térmica global do evaporador	:	UA_{ev}

3.2.5. Dados entrada – casos 2 e 3

São os seguintes:

- 1) Temperatura ambiente: T_{amb} (Anexo 7.1)
- 2) Carga térmica do prédio: \dot{Q}_T (Anexo 7.2)
- 3) Capacidade do chiller : CAP_ch
- 4) Os parâmetros do chiller e do tanque de armazenamento:

Temperatura da água na saída do evaporador	:	T_5
Temperatura da água “gelada” na saída ou entrada do tanque	:	T_6
Temperatura da água “quente” na saída ou entrada do evaporação	:	T_{11}
ΔT de Subresfriamento	:	DT_{sub}
ΔT de superaquecimento	:	DT_{vet}
Eficiência da torre de resfriamento	:	ϵ_{torre}
Vazão mássica da água no evaporador	:	\dot{m}_a
Vazão mássica da água no condensador	:	\dot{m}_c
Eficiência elétrica do motor do compressor	:	η_e
Pressão atmosférica	:	P_{amb}
Umidade relativa media da cidade-historico	:	w_{amb}
Calor específico meio da água no evaporador	:	$c_{p_{ae}}$
Calor específico meio da água no condensador	:	$c_{p_{ac}}$

Eficiência isentrópica ou adiabática de compressor:	η_k
Eficiência mecânica do compressor	: η_m
Condutância térmica global do condensador	: UA_{cd}
Condutância térmica global do evaporador	: UA_{ev} .

3.2.6.

Dados de entrada – para calcular a capacidade do chiller: casos 2 e 3

São os seguintes:

Temperatura ambiente: T_{amb}

Carga térmica do prédio: \dot{Q}_T

Eficiência de armazenamento: n_{ST} (estimativa inicial)

Temperatura da água “gelada” na saída ou entrada do tanque : T_6

Temperatura da água “quente” na saída ou entrada do evaporação : T_{11}

Temperatura máxima (Homan, 1996) : T_{max}

Razão altura/diâmetro do tanque : H/D

3.3.Dados de saída

Os dados de saída são apresentados a seguir, segundo o caso e modo de operação.

3.3.1.

Dados de saída - parâmetros característicos do chiller

Os parâmetros a determinar são:

Condutância térmica global do condensador: UA_{cd}

Condutância térmica global do evaporador: UA_{ev}

Eficiência adiabática do compressor: η_k , e

Eficiência mecânica do compressor: η_m

3.3.2.

Dados de saída – caso 1, 2 e 3

Os parâmetros a determinar, em todos os casos e modos os seguintes:

Potência consumida, \dot{E}_c , e,

Coefficiente de performance, COP.

3.3.3.

Lista das variáveis de saída

São apresentadas no apêndice (7.5)

3.4.

Critérios de convergência

Do modelo desenvolvido resultou um sistema não linear de equações de múltiplas variáveis, que foi resolvido a partir do método Newton-Raphson (empregado pelo EES). Porém é o EES de início o que estabelece os critérios de convergência.

Quando, de início não se consegue uma solução para o número de iterações estabelecido, ou quando os resultados não são concordantes com a física do problema, modificam-se os valores iniciais impostos pelo o EES e se reinicia as iterações.

3.5. Critérios e faixas de operação dos parâmetros do chiller

Para a obter os parâmetros do chiller considera-se que:

- a) A vazão mássica de água na torre de resfriamento fica em torno de 3 galões por minuto e por tonelada de refrigeração (Dossat, 1980).
- b) No caso da efetividade, ela pode variar de 0 ate 1, considerando que, com valores próximos a um, o trocador fica com uma grande área (maior custo de investimento).
- c) Em todas as temperaturas, foi considerado 0.05° C como passo no processo de cálculo.
- d) No caso das equações de balanço de energia no tanque de armazenamento, a vazão mássica de água deve ficar positiva no processo de carga e negativa na direção oposta.

- e) A temperatura na descarga do compressor (T_2) deverá ser menor que 80°C (Rodrigues, 1991).
- f) A eficiência do compressor “ η_{cp} ”, que é igual ao produto de sua eficiência mecânica por sua eficiência adiabática deverá ficar entre 0,70 e 0,90 (Rodrigues, 1991).