



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (EER) DE CONDICIONADORES DE AR DOMÉSTICOS : MEDIÇÃO EM CAMPO x MEDIÇÃO EM CALORÍMETRO

Anastácio da Silva Júnior

Escola Técnica Federal de Santa Catarina – UnED/SJ
Curso de Refrigeração e Ar Condicionado
Rua José Lino Kretzer
88103-310 - São José - SC - Brasil

Vicente de Paulo Nicolau

Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC
Universidade Federal de Santa Catarina
88049 900- Florianópolis – SC - Brasil

Resumo. Neste trabalho descreve-se uma metodologia para a obtenção do coeficiente de eficiência energética de condicionadores de ar domésticos (EER) em campo. Os valores deste índice são fornecidos apenas para aparelhos novos, em uma condição extrema normalizada e medidos em calorímetro. De posse dos valores medidos em campo realizou-se diversas medições em calorímetro a fim de comparar os resultados. Para a utilização dos resultados em programas de simulação realizou-se um modelamento de modo a expressar os valores do EER, em função de duas e de três variáveis representativas do problema analisado.

Palavras-chave: Ar Condicionado, Conservação de Energia, Conforto Térmico, Eficiência Energética, EER

1. INTRODUÇÃO

O consumo energético constitui hoje uma das grandes preocupações da sociedade, pois está diretamente ligado à conservação de recursos naturais, à poluição, à destruição da camada de ozônio, etc. Portanto é muito importante que se obtenha a máxima eficiência dos equipamentos em geral, com um consumo mínimo de energia. Neste contexto se coloca a conservação de energia, onde se procura identificar e reduzir os desperdícios, de modo a evitar futuros racionamentos. A conservação também se faz importante no sentido de minimizar os investimentos realizados no setor elétrico, reduzindo custos para o país e para o consumidor. Estudos mostram que medidas para economizar energia custam menos do que a geração de energia adicional, além de diminuir os impactos ambientais (Geller, 1994).

Atualmente os sistemas de condicionamento de ar são um dos principais consumidores de energia elétrica em edificações, representando cerca de 7% do consumo residencial. No Brasil a porcentagem de residências com condicionador de ar de janela é de 6% das casas com eletricidade, funcionando cerca de 540 h/ano, representando um consumo de 860 kWh/ano por aparelho (Eletrobrás, 1989) e totalizam 1,4 milhões de aparelhos. A gama de equipamentos de condicionamento de ar é enorme e varia desde equipamentos de janela até instalações com várias centenas de TRs (1TR = 3517 W). Entretanto a maioria dos aparelhos de janela vendidos no Brasil é usada em edifícios comerciais, funcionando 1700 h/ano, representando um consumo de 2700 kWh/ano por aparelho, ou seja, 20 % em média do gasto total de energia elétrica do edifício (Geller, 1994). Somando os consumos dos edifícios comerciais e residenciais, tem-se que o condicionamento de ar é responsável por 10 % do uso final da energia elétrica gasta nestes setores em todo o Brasil, significando um consumo de 6800 MWh por ano. Em função destes valores torna-se então evidente a necessidade de estudos visando a quantificação e o aumento da eficiência energética dos condicionadores de ar domésticos.

Ao longo de seu uso tem-se mudanças das características de funcionamento destes aparelhos, alterando sua eficiência energética. Além disto cada ambiente possui diferentes condições de operação, tais como taxa de ocupação, carga térmica, dimensões, temperaturas, etc., que irão afetar os valores de eficiência energética destes sistemas. Daí a necessidade de se obter em campo suas reais características e condições de funcionamento.

O presente trabalho se propõe a obter em campo o valor da eficiência energética de aparelhos de ar condicionado domésticos. Atualmente este dado é fornecido pelo fabricante e obtido em calorímetros para aparelhos novos, em condições controladas, e não se tem dados para os sistemas de condicionamento de ar em condições reais de funcionamento. Para a obtenção do EER (Energy Efficiency Ratio - coeficiente de eficiência energética, em Btu/h/W), desenvolveu-se uma metodologia específica para este fim, já que as condições do calorímetro não podem ser levadas a campo.

Para o cálculo do EER obtém-se um conjunto de leituras composto por temperatura de bulbo úmido e bulbo seco no retorno do evaporador, por temperatura de bulbo úmido e bulbo seco e velocidade (e área de passagem) do ar em cada quadrante do duto posicionado no insuflamento do condicionador de ar. Obtém-se ainda a potência elétrica consumida. Com estes valores obtidos entra-se na carta psicrométrica (disponível em programas de computador), para se obter os valores das entalpias, volumes específicos e umidades, com objetivo de calcular a capacidade de refrigeração (Q_i), do aparelho em estudo. Ao se executar estas medições deve-se tomar o cuidado de que o condicionador de ar esteja funcionando em regime contínuo, ou seja, com o compressor sempre ligado, o aparelho funcionou sem ciclar durante aproximadamente uma hora em uma sala fechada, monitorando-se a temperatura desta sala até que esta estivesse estável. De posse dos valores de capacidade de refrigeração e da potência elétrica consumida, com base na Norma "NBR 5882 (ABNT) - Condicionadores de ar domésticos, determinação das características", calcula-se então a eficiência energética (EER) do aparelho. Este valor é obtido pela razão entre a capacidade de refrigeração (Q_i) e a potência elétrica consumida (Pot).

2. METODOLOGIA

O índice de eficiência que será usado neste trabalho será o EER (Energy Efficiency Ratio), especificado pela norma "ARI(1981). Standard for Unitary Air - Conditioning Equipment. ARI Standard 210 -1981".

As medições das velocidades e temperaturas de bulbo seco e úmido no insuflamento foram feitas utilizando-se um anemômetro e um psicrômetro. O condicionador de ar utilizado para estes levantamentos iniciais foi de capacidade igual a 10000 Btu/h, modelo Airmaster 10.000. Os valores necessários ao cálculo do EER foram colhidos em campo, obtendo-se um conjunto de leituras composto por temperatura de bulbo úmido e bulbo seco no retorno do evaporador, temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, velocidade do ar e área de passagem do ar em cada quadrante da região de insuflamento e finalmente a potência elétrica consumida. Com estes valores obtidos entrou-se na carta psicrométrica, para se obter os valores das entalpias, volumes específicos e umidades, com objetivo de calcular a capacidade de refrigeração (Q_s) do aparelho em estudo. As variáveis necessárias para o cálculo do EER foram medidas em diferentes pontos do condicionador, conforme indicado na “Fig. 1”. Os pontos são os seguintes :

Ponto R - entrada do evaporador (retorno de ar). Neste ponto mede-se temperatura de bulbo seco (TBS_r) e temperatura de bulbo úmido (TBU_r). Com estes dados retirou-se da carta psicrométrica o valor da entalpia do ar (h_r).

Ponto I - saída do evaporador (insuflamento de ar). Neste ponto mede-se temperatura de bulbo úmido (TBU_i), temperatura de bulbo seco (TBS_i), área de passagem do ar (A) e velocidade do ar (V_{ar}) em cada quadrante. Calcula-se então uma média ponderada das temperaturas em função da vazão em cada quadrante. Com estes dados retirou-se da carta psicrométrica os valores da entalpia do ar (h_s) e do volume específico do ar (v_s). A velocidade do ar usada nos cálculos será uma média das velocidades medidas em vários pontos da saída do evaporador, conforme mostrado na “Fig. 1”.

Ponto ambiente externo - este ponto de medição localizou-se fora da edificação, e nele mede-se temperatura externa do ar (T_{ext}).

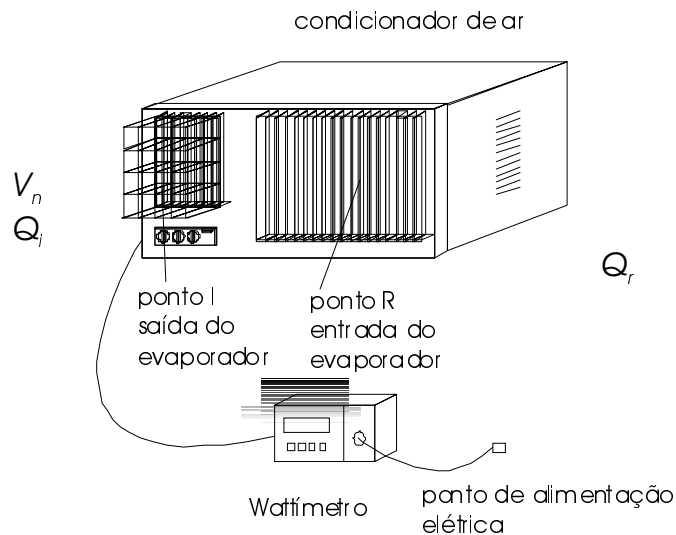


Figura 1 –Pontos de medição no condicionador de ar.

Ponto A – Wattímetro. Neste ponto foi feito o levantamento da potência elétrica consumida pelo condicionador de ar, Pot (W), com o medidor conectado ao seu cabo de alimentação elétrica.

3. CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONDICIONADOR DE AR

Primeiramente, o fluxo de massa de ar no evaporador (m_i) foi calculado pela “Eq. (1)” em função da área (A_i) e da velocidade de passagem do ar (V_i), no insuflamento do condicionador (saída do evaporador),

$$m_i = A_i V_i / v_i \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

sendo v_i o volume específico do ar (base seca).

Por sua vez, a capacidade de refrigeração (Q_i), “Eq. (2)” foi calculada considerando o fluxo de massa de ar no evaporador (m_i), Eq. (1) e a diferença entre as entalpias do ar na entrada (h_r) e na saída do evaporador (h_i).

$$Q_i = m_i (h_r - h_i) \quad [\text{Btu/h}] \quad (2)$$

A potência consumida pelo condicionador (Pot) é obtida diretamente através de leitura em um medidor digital de potência e é o resultado da soma das potências consumidas pelo compressor e pelo ventilador, sendo dada pela Eq. (3).

$$Pot = P_c + P_v \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Finalmente calculou-se o coeficiente de eficiência energética, “Eq. (4)”, como sendo a razão entre a capacidade de refrigeração, Eq. (2), e a potência consumida pelo condicionador, Eq. (3).

$$EER = \frac{Q_i}{Pot} \quad [\text{Btu/h} / \text{W}] \quad (4)$$

Calcula-se o EER, definido pela “Eq. (4)”, a partir dos valores da capacidade de refrigeração e da potência elétrica consumida pelo condicionador. A capacidade de refrigeração será expressa em função das propriedades do ar, a fim de se obter o EER em função das variáveis independentes. Tem-se a seguinte equação :

$$EER = c A V \frac{(h_r - h_i)}{v_r Pot} \quad (5)$$

onde h_r , h_i , v_r são obtidos em função de TBU e TBS e c é o fator de conversão de W para Btu/h. Para tanto utilizam-se as equações das propriedades psicrométricas do ar, tanto para o ar de retorno como para o ar de insuflamento. As entalpias e o volume específico do ar de retorno podem ser obtidas a partir das temperaturas medidas.

4. MODELAGEM DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (EER)

Com os valores dos conjuntos de medições para o condicionador de ar de 10000 Btu/h, ajustou-se várias curvas para os mesmos, com o objetivo de expressar os valores do EER, em

função de duas e de três variáveis. A finalidade deste ajuste é a obtenção de uma equação que forneça o valor do EER em qualquer condição de uso do aparelho. Assim, para uma certa condição de uso, pode-se prever qual será o valor do EER, da potência que será consumida, bem como da carga térmica que o mesmo irá retirar do ambiente. Algumas variáveis foram consideradas na análise, como as temperaturas de bulbo seco e úmido TBS_r e TBU_r , a umidade relativa UR, todas do ar de retorno (interno) e a temperaturas de bulbo seco externa. A utilização desta última é decorrente da sua participação no cálculo da eficiência do próprio ciclo de Carnot. Considerou-se ainda a diferença entre as temperaturas de bulbo seco interna (de retorno) e a externa (ΔT). O ajuste foi realizado com quinze conjuntos de medição para o aparelho. Pode-se então, comparar o valor ajustado com o valor obtido na medição.

Assim, de uma forma geral a eficiência energética EER do condicionador de ar foi representada através de um modelo linear, envolvendo no máximo 3 variáveis. Após uma série de testes concluiu-se que os melhores resultados foram obtidos com a utilização de ΔT e UR como variáveis independente. Desta forma a equação para o modelamento, em função de duas variáveis, assumiu a seguinte forma:

$$Q_i \text{ [Btu/h]} = C_1 \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]} + C_2 \text{ UR [\%]} \quad (6)$$

$$\text{Pot [W]} = C_3 \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]} + C_4 \text{ UR [\%]} \quad (7)$$

Para a obtenção do EER o cálculo é feito conforme a sua definição, ou seja, a razão entre a capacidade de refrigeração e a potência elétrica (Q_i / Pot). Assim o modelo passa a ser a razão entre duas equações lineares.

5. RESULTADOS

Executou-se também uma série de medições com o mesmo condicionador de ar no calorímetro do tipo psicrométrico, da empresa Multibrás-Consul. Para estas medições as temperaturas no calorímetro foram ajustadas de modo a alcançar as mesmas temperaturas das medições efetuadas em campo, possibilitando assim uma análise comparativa dos valores obtidos. Na “Tabela 1” apresenta-se os resultados obtidos no calorímetro para o condicionador ar modelo 10000, variando-se as temperaturas. Os resultados de vários conjuntos de medições realizados em diferentes dias e horários, para o mesmo condicionador de ar são apresentados na “Tabela 2”. Estes resultados mostram diversas condições de temperaturas externas e também internas, refletindo no valor da eficiência EER como seria de se esperar. Este varia de 6,0 a 7,4 Btu/h/W.

Comparando os valores obtidos no calorímetro, “Tabela 1” com as medidas realizadas em campo, “Tabela 2”, tem-se os erros percentuais referente aos dois conjuntos de dados, conforme representados na “Tabela 3”. Constata-se que os resultados para o condicionador de ar modelo 10000 apresentam erros percentuais baixos entre o EER medido em campo e o medido em calorímetro, variando de 1,4 a 5,8%, sendo que a incerteza do resultado de medição do EER em função das variáveis independentes é de 6,5%. Da mesma forma na análise dos valores da capacidade de refrigeração e potência, verifica-se que os resultados estão bem próximos com erro máximo de 6,2 % e 2,2 % respectivamente. Estes valores confirmam assim que a metodologia de medição em campo está adequada.

Tabela 1. Resultados obtidos no calorímetro variando-se as temperaturas

Medição	1	2	3	4	5
Q_i (Btu/h)	7166	7341	8167	7752	7963
Pot (W)	1162	1071	1127	1140	1077
TBS_{ext} (°C)	29,9	23,29	25,5	27,8	22,5
TBU_{ext} (°C)	27,0	20,52	20,6	22,9	20,8
TBS_r (°C)	21,2	19,77	21,0	21,8	20,6
TBU_r (°C)	15,1	13,01	15,3	15,1	14,0
ΔT (°C)	8,7	3,5	4,5	6,0	1,9
UR_r (%)	52,5	46,0	55,1	49,1	48,8
TBS_i (°C)	10,6	7,9	9,9	10,2	8,5
TBU_i (°C)	9,1	6,4	8,5	8,6	7,0
EER(Btuh/W)	6,2	6,9	7,2	6,8	7,4

Tabela 2. Resultados obtidos em campo

Medição	1	2	3	4	5
Q_i (Btu/h)	7167	6928	8157	7269	7815
Pot (W)	1159	1070	1102	1134	1072
TBS_{ext} (°C)	29,9	23,3	25,4	27,7	22,5
TBU_{ext} (°C)	27,0	20,5	20,5	22,2	20,8
TBS_r (°C)	21,3	19,8	21,0	21,8	20,6
TBU_r (°C)	15,1	13,0	15,3	15,1	14,0
ΔT (°C)	8,6	3,5	4,4	5,9	1,9
TBS_i (°C)	9,8	7,4	8,7	9,4	7,6
TBU_i (°C)	8,9	6,6	8,2	8,8	6,9
EER(Btu/h/W)	6,0	6,5	7,4	6,4	7,3

Tabela 3. Comparação entre resultados obtidos em calorímetro e campo para o condicionador de ar modelo 10000

Medição	1	2	3	4	5
$Q_{i\text{ campo}}$	7167	6928	8157	7269	7815
$Q_{i\text{ cal}}$	7166	7341	8167	7752	7963
Erro (%)	0,0	5,6	0,1	6,2	1,8
Pot_{campo}	1159	1070	1102	1134	1072
Pot_{cal}	1162	1071	1127	1140	1077
Erro (%)	0,3	0,1	2,2	0,5	0,5
EER_{campo}	6,0	6,5	7,4	6,4	7,3
ERR_{cal}	6,2	6,9	7,2	6,8	7,4
Erro (%)	2,4	5,8	2,8	5,0	1,4

Com o objetivo de se lançar mão de um processo de identificação mais completo para cada modelo de condicionador de ar, realizou-se uma série de 15 medidas em campo, além do ensaio feito no calorímetro, nas condições normalizadas. Com estes dados calculou-se o EER através da “Eq. (4)”. Aplicou-se em seguida a metodologia de identificação de parâmetros, efetuando-se a identificação dos coeficientes das “Eq. (6 e 7)”. De posse desses coeficientes recalculou-se o EER, a capacidade de refrigeração Q_i e a potência elétrica consumida Pot, comparando-se os valores com os originais obtidos pela “Eq. (4)”. Na identificação dos coeficientes, foram usados os valores obtidos através das medições em campo e no calorímetro (norma) para o condicionador modelo 10000. Calculou-se também os erros percentuais, tendo os valores de EER, Q_i e Pot medidos como base. Finalmente, utilizou-se os parâmetros “Ci” para o modelamento matemático. UR é a umidade relativa do ambiente interno, obtida junto ao ar de retorno e ΔT representa a diferença entre as temperaturas de bulbo seco externa e interna. De acordo com a “Tabela 4”, com a comparação dos resultados das diferenças entre os EERs, verifica-se que o modelo está adequado também para a obtenção de capacidade de refrigeração e potência, uma vez que os erros percentuais são relativamente baixos, no máximo de 12,7 %. Quando se extrapola para os valores da norma, os erros são de 6,5% e 5,1% respectivamente, com erro na estimativa de EER de 2,1%.

Tabela 4 - Comparação dos resultados para os parâmetros ΔT e UR, condicionador modelo 10000

medição	Q_i (Btu/h)	POT (W)	EER (Btu/h/W)	Q_i calc (Btu/h)	Erro (%)	Pot calc (W)	Erro (%)	EERcalc (Btu/h/W)	Erro (%)
1	7167	1159	6,2	7300	-1,9	1190	-2,7	6,1	0,8
2	7201	1158	6,2	7097	1,4	1139	1,7	6,2	-0,2
3	7850	1105	7,1	7709	1,8	1160	-5,0	6,6	6,4
4	6928	1070	6,5	7164	-3,4	1002	6,4	7,2	-10,4
5	7372	1127	6,5	7164	2,8	1089	3,4	6,6	-0,5
6	7133	1103	6,5	7286	-2,1	1091	1,1	6,7	-3,3
7	8157	1102	7,4	8592	-5,3	1208	-9,7	7,1	3,9
8	8533	1121	7,6	8307	2,6	1149	-2,6	7,2	5,1
9	7986	1092	7,3	8152	-2,1	1134	-3,8	7,2	1,7
10	7269	1134	6,4	7301	-0,5	1099	3,0	6,6	-3,6
11	8328	1056	7,9	8682	-4,3	1115	-5,6	7,8	1,3
12	6621	1086	6,1	7027	-6,1	1069	1,6	6,6	-7,8
13	7952	1110	7,2	7458	6,2	1102	0,7	6,8	5,5
14	7986	1083	7,4	7036	11,9	946	12,7	7,4	-0,9
15	7816	1072	7,3	7875	-0,8	1036	3,4	7,6	-4,3
norma	8243	1273	6,5	7824	5,1	1233	3,1	6,3	2,1
C1	-178	12							
C2	171	21							

De acordo com estes resultados, o desempenho do aparelho utilizado pode ser representado pelos seguintes modelos :

$$Q_i \text{ [Btu/h]} = -178 \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]} + 12 \text{ UR [\%]}$$

$$\text{Pot [W]} = 171 \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]} + 21 \text{ UR [\%]}$$

Por sua vez o modelo para o EER é dado por:

$$\text{EER} = -0,24 \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]} + 0,16 \text{ UR [\%]}$$

7. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que, apesar da complexidade envolvida no presente problema, o modelo apresentado funciona a contento, dentro do objetivo inicial de utilizar um modelo simples.

Sabe-se que por razões econômicas as medições em campo são necessárias, mas mostrou-se neste trabalho que não são simples. Não basta simplesmente fazer um único ensaio para determinar o desempenho de um condicionador de ar já em uso ou mesmo novo. Nas várias condições de funcionamento que sujeitam o aparelho, este desempenho varia bastante, surgindo a necessidade de se adotar modelos que representem esta variação. Na análise de incerteza de medição verificou-se que as variáveis que tem maior peso no cálculo do EER são TBU_r e a velocidade do ar no insuflamento.

Dos modelos disponíveis adotou-se um modelo linear, pela simplicidade. Investigou-se a participação de várias variáveis, mas finalmente os melhores resultados foram obtidos com a diferença entre as temperaturas de bulbo seco interna e externa e a umidade relativa do ar interno.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 1983, Condicionadores de Ar Domésticos, Determinação das Características, Norma NBR 5882.
- ABNT, 1983, Condicionadores de Ar Doméstico – Especificação, Norma NBR 5858.
- ANSI/ASHRAE, 1988, Practices for Measurement, Testing, Adjusting, and balancing of Building Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration Systems, Standard 111.
- ARI, 1981, Standard for Unitary Air - Conditioning Equipment. ARI Standard 210.
- ASHRAE, 1993, Energy Code for Commercial and High Rise Residential Buildings.
- ASHRAE, 1993, Handbook FUNDAMENTALS.
- ELETROBRÁS, 1989, Revisão de Metas de Consumo de Energia Elétrica.
- Geller, H.S., 1991 Efficient Electricity Use, A Development Strategy for Brazil, ACEEE, Washington D.C.
- Holman, Jack P., 1985, Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill Book Company.
- Incropera, Frank P. & Wit, David P. , 1992, Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, Ed. Guanabara-Koogan.
- Kao, James Y., 1992, Hvac Functional Inspection and Testing Guide, NIST.

Lamberts, Lomardo, Aguiar & Thomé, 1996, Eficiência Energética em Edificações: Estado da Arte, UFSC.

Silva Jr., Anastácio, 1998, Medição em Campo do Coeficiente de Eficiência Energética (EER) de Condicionadores de Ar Domésticos. Dissertação de Mestrado em Eng. Civil – UFSC, Florianópolis-SC.

Stoecker, W.F. & Jones, J.W., 1985, Refrigeração e Ar Condicionado, McGraw-Hill.

Wan Wylen, G.J. & Sonntag, R.E., 1985, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, John Wiley, New York.

ENERGY EFFICIENCY (EER) OF RESIDENTIAL AIR CONDITIONERS: MEASUREMENT IN FIELD X MEASUREMENT IN CALORIMETER

The present article presents a method to evaluate, in field, the energy efficiency rate of residential air conditioners. Currently, this data is obtained in calorimeters, in controlled conditions and there is no data for systems in real conditions of functioning. To obtain the EER (energy efficiency rate in Btu/h / W), we developed a specific methodology, once the calorimeter conditions cannot be taken to field.

Keywords : Air Conditioning, Energy resource, Thermal comfort, Energy efficiency, EER.