

Desempenho energético e consumo de água em refrigeradores de ar por evaporação direta: Metodologia para climatizador residencial EVR2021-0021

Patrick O. Guedes^{1*}, Robson L. Silva^{1,2}

¹ UFGD – Universidade Federal da Grande Dourados, FAEN – Faculdade de Engenharia
Dourados-MS, Brasil, CEP: 79.804-970

² PEM – Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica (Ciências Térmicas), UEM – Universidade Estadual de Maringá
Maringá-PR, Brasil, CEP: 87.020-900

* patrickog99@gmail.com

Resumo

O objetivo é avaliar o desempenho energético e consumo de água em refrigeradores de ar por evaporação direta. A metodologia é proposta utilizando aspectos pertinentes em normas técnicas internacionais e nacionais, e aplicada a um climatizador residencial de pequeno porte. Os ensaios são em três diferentes velocidades angulares do ventilador centrífugo, e correspondente aquisição de dados nas condições de entrada e saída, incluindo: temperatura de bulbo seco, umidade relativa, velocidade do escoamento de ar, corrente elétrica e massa de água consumida, dentre outros; e seção transversal de saída com 25 pontos de referência (subseções com 50 x 50 mm). As medições permitem determinar os parâmetros de desempenho via equações de conservação de massa e energia. As conclusões principais são: a) A efetividade (ϵ) é pouco alterada em função da vazão, porém sensível a pequenas alterações na temperatura de entrada ($\Delta T_{BS,e} \sim 0,4^\circ\text{C}$). O índice de eficiência energética (EER) é reduzido para maior vazão/rotação, e condições operacionais de máximo requerem investigação adicional; b) O consumo de água do reservatório alcança $\sim 1 \text{ kg}$ para $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de vazão volumétrica nominal; c) Na comparação de desempenho, $\text{EER} < 26\%$ corresponde a “7G” em analogia à ENCE /PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem de equipamentos consumidores de energia. Análise mais completa deve considerar outros limites do envelope de condições psicrométricas locais, permitindo obter um envelope de desempenho robusto.

Paravras-chave: Resfriamento evaporativo, Climatização, Eficiência Energética.

Introdução

Climatizadores evaporativos são sistemas destinados ao condicionamento de ambientes, sendo opção interessante a sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Na obtenção de conforto térmico, a energia consumida por climatizadores evaporativos é pelo menos 10 vezes menor, embora o desempenho seja reduzido quanto umidade do ar ambiente é originalmente elevada (Bottega e Souza, 2015). O resfriamento evaporativo é um processo de mistura de ar seco e água (vapor), para obter ar com umidade aumentada e redução da temperatura – devido à evaporação de água, originalmente na fase líquida. Comparativamente, apresenta facilidade de instalação e manutenção, maior sustentabilidade - não utiliza fluidos refrigerantes HFC e CFC, além do baixo consumo de energia (Camargo, 2009).

Resfriadores evaporativos podem ser classificados em três tipos: Refrigeração Evaporativa Direta (RED), Indireta (REI) ou misto, com eventual sistemas de regeneração. No RED, o ar troca calor e massa com a água no reservatório do equipamento, ou seja, o escoamento de ar é umidificado e diretamente fornecido ao ambiente; é utilizado para reduzir a temperatura do ambiente e aumentar a umidade. Para o REI, o ar umidificado passa por um trocador de calor e resfria o ar insuflado, reduzindo a temperatura sem troca de massa com a água do reservatório; recomendado para ambientes com umidade mais elevada ou em processos que o objetivo é obter ar frio com baixa umidade. O modelo misto reúne os dois mecanismos em estágios do equipamento.

O objetivo é avaliar indicadores para o desempenho energético e consumo de água em refrigeradores de ar por evaporação direta. É proposta uma metodologia aplicável a climatizador residencial de pequeno porte, considerando levantamento de aspectos pertinentes descritos em normas técnicas internacionais (Irã, Índia e Austrália) e nacionais/brasileiras (equipamentos unitários de condicionamento de ar e torres de resfriamento). Os resultados iniciais são obtidos em condições de ensaios para prospecção, visando subsidiar atividades de P,D&I que possam auxiliar na elaboração de uma etiqueta de eficiência energética (ENCE) e procedimentos experimentais associados no âmbito do INMETRO e PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem, atualmente inexistentes no Brasil para climatizadores evaporativos.

Metodologia

Envelope de condições psicrométricas

A amplitude térmica para a região de Dourados-MS é de 5°C a 37°C (INMET, 2020). Assim, foi definido um envelope na carta psicrométrica delimitado por $5^\circ\text{C} \leq T_{BS} \leq 40^\circ\text{C}$ e $10\% \leq UR \leq 80\%$, conforme Figura 1. A carta psicrométrica é um diagrama que foi desenvolvido com o objetivo de simplificar as relações entre as propriedades do ar úmido (Simões-Moreira e Neto, 2019), cuja visualização gráfica inclui: temperaturas (de bulbo seco e úmido), umidade relativa e absoluta, entalpia.

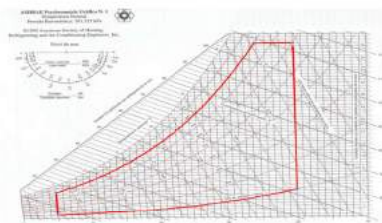


Figura 1: Envelope de condições locais na carta psicrométrica.

Equipamento para ensaios

O climatizador evaporativo ensaiado, destacando a seção de saída é conforme Figura 1 (Marca: Ventisol; Modelo: CLM-01), classificado como RED. Apresenta as seguintes especificações técnicas: Vazão volumétrica nominal de 350 m³.h⁻¹; Reservatório de água com capacidade máxima de 4L; Potência nominal de 75W (127 V e 60 Hz); Dimensões 280 x 250 x 520 mm; Peso bruto de 5,25 kg.



Figura 2: Climatizador utilizado (face frontal) e esquema de funcionamento (RED) (Boukhanouf et al., 2013).

Instrumentos de medição: especificação e calibração

As grandezas medidas são: (1) Massa consumida de água, via balança digital; (2) Temperatura e umidade relativa no ambiente e entrada, via psicrômetros; (3) Temperatura e umidade relativa na saída, via termopares (tipo K) e psicrômetro; (4) velocidade do escoamento de ar na saída (face frontal), via anemômetro de hélice. Na Tabela 1, as características metrológicas dos instrumentos de medição.

Tabela 1: Especificações dos instrumentos de medição.

Código do instrumento	Medição	Resolução	Incerteza do Instrumento
Balmak ELP-10	Massa	1 g até 5 kg; 2 g até 10 kg	± 1 g
Instrutherm THR-150	Temperatura	0,1°C	±0,05%+0,3°C
Instrutherm TH-1300	Temperatura	0,1°C	±0,5% +2°C
Instrutherm HT-270	Temperatura e Umidade	0,01% UR; 0,01°C	±3,5% UR; ±0,8°C
Precision Gold N18FR	Temperatura e Umidade	0,1%; 0,1°C	± 0,05%; ± 0,05°C
Texto 416	Velocidade do ar	0,1 m/s	±0,2 m/s+1,5%
Instrutherm VA-750	Multímetro	1V; 100mA	±1% (V); ±2% (mA)
Instrutherm TD-813	Tacômetro	0,1 RPM	±0,05% ± 1 dígito

A balança foi calibrada utilizando padrões de massa (1 ± 0,0005 kg, 2 ± 0,0010 kg e 5 ± 0,0025 kg) (ABNT, 2017). O conjunto, termopar e mostrador de temperatura, foi submetido a duas etapas de calibração (ABNT, 2001 & 2015): (a) Gerador de sinal para o dispositivo mostrador; (b) Sensores - por comparação, utilizando de sistemas de

temperatura conhecida (recipiente de água em banho de gelo e outro para água em ebulição). A incerteza adotada como referência foi o maior valor entre aquele apresentado pelo instrumento de medição e pelo processo de calibração, ou seja, ± 1 g e ± 0,53°C para os valores indicados de massa e temperatura, respectivamente. Na condição de saída a temperatura é medida com o instrumento THR-150 e a incerteza da calibração predomina (± 0,53°C); e na entrada, a medição é com o instrumento TH-1300 e a incerteza do instrumento é superior (~ ± 2,5°C); para a massa, a incerteza da calibração e do instrumento são equivalentes (± 1 g).

Procedimento experimental

Antes de iniciar cada ensaio, registrou-se: temperatura e umidade relativa do ambiente, temperatura da água no reservatório, tensão e corrente elétrica, e velocidade angular correspondente (rotação das pás do ventilador). Visando obter ensaios em condição de regime permanente, aquisição de dados ocorreu após 30 minutos do equipamento ligado.

Início e fim de cada ensaio: Consumo de água (vazão em massa) transferida ao escoamento de ar, é obtido pela diferença entre a massa total do conjunto (climatizador e água no reservatório) no início e término do ensaio.

Durante o ensaio: para cada velocidade angular, nas seções transversais de entrada e saída do climatizador: Aquisição de dados para temperatura de bulbo seco, umidade relativa e velocidade do escoamento de ar.

Na seção transversal de entrada as medições foram realizadas em um único ponto (centro geométrico). A seção transversal de saída (face frontal, Figura 2) considerou 25 posições/subseções (área total = 551 cm²) e aquisição de dados durante 60 segundos, utilizando o valor médio. A distância horizontal entre a seção transversal e pontos de medição é 0,9 m para a entrada e saída. Este distanciamento é recomendado na NBR 11215 (ABNT, 2016) – aplicável a equipamentos unitários de ar condicionado e bombas de calor; especifica a realização de ensaios em ambiente onde exista área sem obstrução pelo menos 1,8 m à frente e, pelo menos 0,90 m do restante do equipamento.

Desempenho energético e consumo de água

A efetividade é um parâmetro de desempenho usual em sistemas térmicos permitindo comparação entre diferentes equipamentos; incluindo análise do resfriamento evaporativo (Riangvilaikul e Kumar, 2010). Corresponde à razão entre a diferença de temperaturas de bulbo seco – na entrada e na saída, e a diferença – na entrada, entre a temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, Eq. (1).

$$\varepsilon = \frac{T_{BS,e} - T_{BS,s}}{T_{BS,e} - T_{BU,e}} \cdot 100 \quad (1)$$

O consumo ou vazão mássica de água, i.e., fornecida ao escoamento de ar úmido que é entregue ao ambiente, é obtido por medição indireta, com duas abordagens, Eq. (2.a) e (2.b). Onde: v (m.s⁻¹) é a velocidade do escoamento de ar na saída do climatizador, A (m²) é a área de saída, ρ_w (kg.m⁻³) é a massa específica da mistura ar/água, m_i é a massa do equipamento no início do ensaio, m_f é a massa após o término do ensaio e t (h) é o tempo de duração do ensaio.

$$\dot{m} = \rho_w \cdot v \cdot A \quad (2a)$$

$$\dot{m} = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (2b)$$

O EER - índice de eficiência energética (do inglês, *Energy Efficiency Ratio*) é outro parâmetro de desempenho aplicado a climatizadores evaporativos (Effatnejad e Salehian, 2009), Eq. (3). É a proporção entre a capacidade de resfriamento do equipamento (ou “potência térmica”, $W = J.s^{-1}$) e a potência consumida (ou “potência elétrica”, $W = J.s^{-1}$); esta última é determinada indiretamente (1ª Lei de Ohm), com valores medidos para diferença de potencial e corrente elétrica, para cada rotação/vazão do ventilador.

$$EER = Q_s / P_{Elétrica} \quad (3)$$

A capacidade de resfriamento é a quantidade de calor removido do ar no processo de resfriamento evaporativo. Pode ser descrita como o calor sensível (Torkaman e Ghassembaglou, 2015), conforme Eq. (4), uma vez que as outras trocas de calor do sistema são muito menores a esta.

$$\dot{Q}_s = \rho_a \cdot \dot{V}_a \cdot C_{p,a} \cdot (T_{BS,e} - T_{BS,s}) \quad (4)$$

O calor sensível é obtido utilizando a massa específica do ar via carta psicrométrica e *software* CATT3 (WILEY, 2021), $\rho_{ar-entrada} (kg.m^{-3}) = v_{ar-entrada}^{-1}$. A vazão de ar seco é determinada com a velocidade do ar e área de saída, desconsiderando a vazão de umidade que passa no painel evaporativo. As características do ar seco são: $\rho_a (kg.m^{-3})$, $V_a (m^3.s^{-1})$ e $C_{p,a} (J.kg^{-1}.K^{-1})$, respectivamente massa específica, vazão volumétrica e calor específico ($C_{p,a}=1,007 kJ.kg^{-1}.K^{-1}$; Effatnejad e Salehian, 2009).

Na saída, uma melhor consistência das propriedades psicrométricas é obtida utilizando TBS e UA (ao invés da medição para UR), a qual é determinada pela Eq. (5). Onde: $\omega_e (kg \text{ água/kg ar seco})$, $m (kg.h^{-1})$ é o consumo de água (Eq. 2), $V_t (m^3.h^{-1})$ e $\rho_t (kg.m^{-3})$ são, respectivamente, a vazão total e a massa específica da mistura (ar+vapor de água).

$$w_s = w_e + m / (V_t \cdot \rho_t) \quad (5)$$

Resultados e discussão

Na Figura 3, tem-se os campos de velocidade, umidade e de temperatura (TBS) na saída. As maiores velocidades apresentaram-se na região central do climatizador, sendo que se apresentou uma tendência de deslocamento para o lado direito a partir da última rotação. Considerando as rotações de 960 e 1020 RPM, percebeu-se um campo de temperaturas mais sensível a variações no lado direito – onde o escoamento apresentou maiores velocidades. A umidade mostrou maiores alterações com menor vazão.

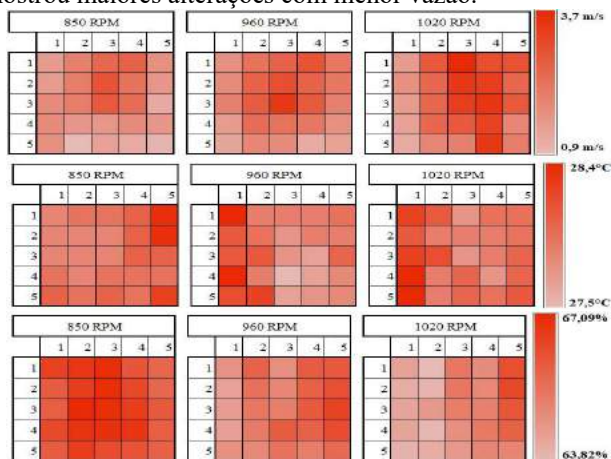


Figura 3: Campos de velocidade, T_{BS} e UR (seção de saída).

Na Tabela 3, tem-se as demais propriedades termodinâmicas, incluindo TBU e UA, nas condições de entrada e saída. O volume específico diminui na saída, pois uma quantidade de água (vapor) é acrescentado no processo de resfriamento evaporativo; ou seja, a UA é superior na saída em relação à entrada, além de implicar em nova condição de equilíbrio (pressão da mistura ar/água). Isto resulta na redução de TBU e UR na saída em relação à entrada, consistente com o processo de resfriamento evaporativo. Embora a incerteza associada à temperatura medida na entrada ($\pm 2,50^\circ C$) seja superior à saída ($\pm 0,53^\circ C$), a primeira corresponde a condição ambiente mais estável.

Tabela 3: Propriedades psicrométricas.

	850 RPM	960 RPM	1020 RPM
TBU,e (TBS,e) $\pm 2,50^\circ C (^\circ C)$	24,44 (29,70)	24,47 (29,90)	24,56 (30,00)
TBU,s (TBS,s) $\pm 0,53^\circ C (^\circ C)$	24,90 (27,60)	24,94 (27,80)	25,08 (27,90)
UR,e (%)	65,22	64,20	64,12
UR,s (%)	80,65	79,68	80,08
UA,e (kg vapor/kg ar)	0,0173	0,0171	0,0172
UA,s (kg vapor/kg ar)	0,0189	0,0188	0,0190
VE,e ($m^3 / kg \text{ ar}$)	0,881	0,881	0,882
VE,s ($m^3 / kg \text{ ar}$)	0,878	0,878	0,878

Na Tabela 4, tem-se os parâmetros de desempenho. A efetividade indica que ocorre redução de T_{BU} na saída em relação à entrada (resfriamento do ar), com mesma ordem de grandeza ($\epsilon \sim 39\%$), i.e, pequena variação para demais vazões; possivelmente devido às pequenas variações em $T_{BS,e}$ ($29,68^\circ C \leq T_{BS,e} \leq 30,02^\circ C$) nas três rotações do ventilador. A vazão/consumo de água apresenta diferença máxima de 0,052 kg (em 850 RPM), comparando ambas as abordagens (Eq. 2.a e 2.b). De qualquer maneira, ocorre significativo aumento no consumo de água para maiores vazões de ar passando nos painéis evaporativos (colmeia do climatizador sob condições de entrada/ambiente).

Tabela 4: Parâmetros de desempenho obtidos.

Rotação do ventilador	850 RPM	960 RPM	1020 RPM
Efetividade (ϵ , %)	38,74	39,23	39,56
Calor sensível, Q (kW) & (TR)	0,2296 (0,0653)	0,2879 (0,0819)	0,3391 (0,0964)
Potência (P, kW)	0,0127	0,0254	0,0381
EER (%)	18,08	11,34	8,90
Vazão de água/umidade (Q_{H_2O} , kg.h ⁻¹)	7,788	9,259	10,869
Vazão de ar seco ($Q_{Ar-seco}$, kg.h ⁻¹)	404,294	483,252	561,167
Consumo de água (kg.h ⁻¹), Eq. (2a)	0,659	0,837	1,030
Consumo de água (kg.h ⁻¹), Eq. (2b)	0,708	0,837	1,083

Quanto ao EER, ocorre significativa redução com o aumento da vazão/rotação do ventilador ($\sim 18\% \rightarrow \sim 9\%$), em comparação a ϵ que apresenta discreto aumento e é praticamente constante ($\epsilon \sim 39\%$). EER superior nas condições de menores vazões é um comportamento

associado a outros aspectos que requerem investigação aprofundada nos mecanismos que implicam no desempenho global climatizador evaporativo, tais como: a) Possível indicativo de que a carga térmica sensível (Q) não aumenta na mesma proporção que a corrente elétrica demandada pelo climatizador; b) Comportamento das curvas características do ventilador, em especial da potência do escoamento versus vazão/rotação e eficiência elétrica/mecânica/escoamento – não fornecidas pelo fabricante do equipamento; c) Desempenho do equipamento sob condições de entrada significativamente distintas quanto aos TBS e UR do ar ambiente; d) Desempenho comparativo, por meio de parâmetros normalizados e/ou equipamentos com diferente geometria/tamanho nas mesmas condições de entrada.

Por fim, a Tabela 5 apresenta um aspecto relevante quanto à classificação de desempenho de climatizadores evaporativos para fins de etiquetas de eficiência energética (Torkaman e Ghassemlaglou, 2015). O equipamento ensaiado enquadra-se na categoria “7G”, ou seja, $EER < 26$ (Tabelas 4 e 5). Além dos aspectos elencados anteriormente quando às condições de desempenho, o desempenho de processos de resfriamento evaporativo direto (RED) é tão melhor quanto menor for a UR do ar na condição de entrada. Neste aspecto é importante destacar que as condições de entrada de ar durante os ensaios neste trabalho situaram-se em $\sim 65\%$ ($64,12\% \leq UR \leq 65,22\%$). Possivelmente deve-se obter $EER > 26\%$ em condições de $UR < 55\%$ - condições de referência na comparação de desempenho em vigor no Irã, de clima árido (Torkaman e Ghassemlaglou, 2015).

Tabela 5: EER para climatizadores evaporativos – Categorias de desempenho no Irã (Torkaman e Ghassemlaglou, 2015)

$EER \geq 65$	→ 1A
$58 \leq EER < 65$	→ 2B
$50 \leq EER < 58$	→ 3C
$42 \leq EER < 50$	→ 4D
$34 \leq EER < 42$	→ 5E
$26 \leq EER < 34$	→ 6F
$EER < 26$	→ 7G

Conclusões

O desempenho do climatizador evaporativo é quantificado por ε e EER. A efetividade é pouco alterada em função da vazão, porém sensível a pequenas alterações na temperatura de entrada ($\Delta T_{BS,e} \sim 0,4^\circ\text{C}$). O índice de eficiência energética é reduzido para maior vazão/rotação; investigação adicional permitirá melhor compreensão dos mecanismos relevantes associados ao processo de resfriamento evaporativo no equipamento ensaiado e condições operacionais de máximo desempenho.

O consumo de água é consistente, obtido diretamente, $f(\Delta m)$ ou indiretamente, $f(\rho_w, v, A)$; com $\uparrow Q_{Ar-seco}$ tem-se maior consumo de água, i.e., maior quantidade é evaporada ($\uparrow$ carga térmica de calor latente) e transportada pelo ar seco ao passar nos painéis umidificados. Deve-se investigar a influência da vazão total em eventual limite do equipamento e processo de mistura ar/água ($\Delta Q_{Ar-seco} \sim 150 \text{ kg.h}^{-1}$ implicam em $\Delta Q_{H_2O} \sim 2,4 \text{ kg.h}^{-1}$ e consumo de água $\sim 0,38 \text{ kg}$).

Na comparação de desempenho, o climatizador ensaiado apresenta $EER < 26\%$ ou “7G” em analogia à ENCE - programa brasileiro de etiquetagem de equipamentos consumidores de energia. Uma análise mais completa precisa considerar outros limites do envelope de condições psicrométricas locais, gerando um envelope de desempenho.

Ressalta-se não haver no Brasil um índice ou normativa de base para a eficiência energética de equipamentos com princípio de resfriamento evaporativo, tão somente para ventiladores residenciais (mesa e teto) ou condicionadores de ar por compressão de vapor.

Agradecimentos

Bolsa PIBIC/PIBITI via UFGD e CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e suporte ao PEM/UEM via CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. “NBR 11.215: Equipamentos unitários de ar-condicionado e bomba de calor – Determinação da capacidade de resfriamento e aquecimento”. 44p.
- , 2001. “NBR 14.670: Indicador de temperatura para termopar - Calibração por comparação utilizando gerador de sinal”. 7p.
- , 2015. “NBR 14.610: Indicador de temperatura com sensor —Calibração por comparação”. 11p.
- , 2017. “NBR 17.025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração”. 38p.
- Boukhanouf, R.; Alharbi, A.; Ibrahim, H.; Kanzari, M. (2013). Investigation of a sub-wet bulb temperature evaporative cooler for buildings. Proc. Sustainable Building Conf. 2013. DOI: 10.7763/JOCET.2014.V2.127
- Bottega, L. D.; Souza, S. N. M. (2015). Análise da eficiência de um sistema de resfriamento evaporativo para a cidade de Cascavel-PR., Rev. Bras. Energ. Renováveis, 4(3), 131-145. DOI: 10.5380/rber.v4i3.41873
- Camargo, J. R. (2009). Resfriamento Evaporativo-Climatização ecológica. Rio de Janeiro: Ciência Moderna
- Effatnejad, R.; Salehian, A. B. (2009). Standart of energy consumption and energy labeling in evaporative air cooler in Iran. Int. J. Tech. Physical Prob. Eng., 1(1), 54-57. DOI: 2077-3528/ ISSN
- INMET. Dados históricos anuais. Inst. Nacional de Meteorologia, 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso: 27 Setembro 2020.
- Riangvilaikul, B.; Kumar, S. (2010). An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system. Energy and Buildings, 42(1), 637-644. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.10.034
- Simões-Moreira, J. R.; Neto, A. H. (2019). Fundamentos e aplicação da psicrometria. 2.ed. São Paulo: Blucher.
- Torkaman, L.; Ghassemlaglou, N. (2015). Evaporative air coolers optimization for energy consumption reduction and energy efficiency ratio increment. Int. J. Mec. Mecha Eng., 9(4), 622-627. DOI: 10.5281/zenodo.1100541
- Wiley, J. (2021). CATT3: computer aided thermodynamics tables 3. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/tarik/disciplinas/termodinamica-a-cod-em34f/Software%20CATT3.exe/view>> Acesso: Fev. 2021.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.