



Análise preliminar do desempenho de um climatizador de ar comercial com painel evaporativo utilizado em clima quente e úmido

Jesus Marlinaldo de Medeiros¹, João Paulo de Lima Silva², Jesarela Merabe Silva Freire³, Marcio Gomes da Silva⁴, Andrei Hudson Guedes Braga⁵

¹Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cabedelo. e-mail: jesus_medeiros@yahoo.com.br

²Instituto Federal Educ. Ciência Tecnologia da Paraíba, Campus Cabedelo. Bolsista PIBIC EM-CNPq. e-mail: jesarela-msf@hotmail.com

³Instituto Federal Educ. Ciência Tecnologia da Paraíba, Campus Cabedelo. Bolsista PIBIC EM-CNPq. e-mail: joao.paulo_1080@hotmail.com

⁴Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus João Pessoa. e-mail: mgcefet@gmail.com

⁵Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Ipojuca. e-mail: andrei_projetos@yahoo.com.br

Resumo: O sistema de resfriamento evaporativo surge como uma alternativa econômica e ecológica para substituir o sistema tradicional em determinadas regiões, devido ao menor consumo de energia elétrica, melhora da qualidade do ar interior e diminuição da agressão ambiental, pois não utiliza fluidos refrigerantes halogenados. O resfriamento evaporativo é um processo natural que diminui a temperatura do ar e eleva sua umidade relativa, devido aos mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água. Foi investigado um climatizador de ar comercial tipo resfriador evaporativo com superfície molhada em condições de clima quente e úmido, inserindo instrumentação para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar na entrada e saída do equipamento através de dois termohigrômetros e dois termômetros totalizando oito sensores tipo K e dois sensores de umidade relativa com sistema de aquisição de dados. Os resultados mostraram a evolução da temperatura do ar e água em torno da superfície molhada em regime transiente. Foi observado que a água de circulação atingiu a temperatura de bulbo úmido e o efeito de resfriamento evaporativo foi obtido no ar após o painel evaporativo, mas não transferido satisfatoriamente para o ar de saída do climatizador comprometendo o desempenho do equipamento. Em todos os experimentos, a condição de conforto térmico não foi atingida com o climatizador, sendo necessário, mais estudos para analisar, avaliar e melhorar o equipamento para aplicação na região de clima quente e úmido.

Palavras-chave: climatizador, resfriamento evaporativo, umidificação, fluidos naturais.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do cenário de crise internacional, a demanda energética mundial continua crescendo a cada ano devido ao crescimento populacional e suas transformações socioeconômicas. Contudo, a oferta de energia não acompanha esse crescimento, sendo necessária sua utilização racional e otimizada. Além disso, deve-se buscar por investimentos em matrizes energéticas limpas que não contribuam para a degradação do meio ambiente, indispensável ao desenvolvimento sustentável dos diferentes setores industriais. Nesse contexto, os sistemas de condicionamento de ar de ambientes têm sido cada vez mais usados em todo o mundo gerando grande consumo de energia. Atualmente, novas tecnologias de resfriamento têm sido estudadas para substituição dos sistemas convencionais (compressão a vapor), pois seu uso intenso pode levar a um colapso tanto energético quanto ambiental.

O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e elevação de sua umidade relativa através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água. Tem como atrativos e benefícios: o baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, de instalação, de operação e de integração a sistemas de condicionamento de ar já instalados. Além do mais, trabalha com renovação total do ar, eliminando a recirculação e proliferação de fungos e bactérias, elevando assim, a qualidade do ar do recinto. Também não usa fluidos poluentes. Apesar da sua simplicidade e do baixo custo de aquisição e operação, a redução de temperatura obtida no resfriador evaporativo depende mais da umidade relativa do que da temperatura do ambiente. Por essa razão, para clima quente e seco é útil, mas para clima úmido é ineficiente.

O sistema de resfriamento evaporativo direto tem sido amplamente utilizado em regiões áridas como no sudoeste dos Estados Unidos, na Austrália, na Ásia ocidental e no sudoeste da China.

No Brasil, o sistema de resfriamento evaporativo tem potencial para ser instalado, praticamente, em todo território nacional, variando sua eficiência de acordo com a temperatura de bulbo úmido da região. (CAROSSO, 2006).

Uma revisão bibliográfica sobre a utilização do resfriamento evaporativo para conforto térmico foi detalhada a seguir:

Wu et al., 2009 investigaram a transferência de calor e massa entre o ar e a água em um resfriador evaporativo direto com superfície molhada propondo uma correlação para determinar a efetividade de resfriamento em função da velocidade do ar e da espessura do painel evaporativo. Os resultados gerados foram validados com dados experimentais apresentando um bom ajuste possibilitando utilização como ferramenta no projeto desse equipamento.

Fouda e Melikyan, 2011 estudaram a transferência de calor e massa entre o ar e a água em um resfriador evaporativo direto com superfície molhada utilizando um modelo matemático para resolver o sistema de equações da continuidade, da quantidade de movimento, da energia e da concentração do ar através da discretização das equações via método das diferenças finitas. Os resultados obtidos foram validados com dados experimentais disponíveis na literatura e apresentaram um bom ajuste. A influência da velocidade e temperatura do ar de entrada e a espessura do painel evaporativo para determinar o desempenho do equipamento foram analisadas.

Santos et al., 2011 estudaram teoricamente o problema de transferência de calor e massa entre o ar e a água em um lavador de ar aplicado para resfriamento evaporativo direto utilizando uma solução analítica levando em consideração a resistência térmica na película líquida e a variação de propriedades do ar e da água. Os resultados obtidos apresentaram excelente concordância com resultados disponíveis na literatura. Foram observadas as influências da temperatura, da razão de umidade e da velocidade do ar de entrada do lavador e da temperatura da água no desempenho do equipamento.

Sheng e Agwu Nnanna, 2012 analisaram a influência da velocidade do ar, temperatura do ar e temperatura da água no desempenho de um resfriador evaporativo a partir de dados experimentais obtendo uma correlação empírica. Os resultados experimentais mostraram que o rendimento do equipamento melhora com aumento da temperatura de entrada do ar, diminuição da velocidade do ar e diminuição da temperatura da água.

Nesse trabalho, o objetivo principal é analisar os fenômenos de transferência de calor e massa associados no equipamento, através da medição dos perfis de temperatura e umidade no interior de um climatizador de ar comercial para conforto térmico de ambientes de clima quente e úmido, pois sua oferta passou a ser crescente por fabricantes no mercado nacional, mas faltando maiores informações da tecnologia evaporativa, suas aplicações e suas limitações e o desempenho do equipamento para localidade do consumidor.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O climatizador de ar CL07F ELECTROLUX utilizado na pesquisa é mostrado na Fig. 1, onde são detalhadas na vista frontal as aletas direcionais do ar de saída, painel de controle das funções do equipamento (umidificar, brisa, ventilar, standby, timer, dormir, purificar) e gaveta onde é armazenada a água e duas caixas de gel para manter a temperatura da água próximo da temperatura de bulbo úmido do ar. Enquanto que, na vista traseira é mostrado o sistema de filtragem composto de ultra filter, filtro de nylon e filtro colméia para umidificação do ar constituído de painel evaporativo. Na Figura 1, não é possível visualizar o ventilador tipo siroco, a bomba de água, a placa de circuito eletrônico, as tubulações e demais acessórios.

Na Figura 2 mostra-se um diagrama esquemático do climatizador de ar e os pontos de medição de temperaturas do ar e da água no interior do equipamento formando o experimento. Ao ligar o equipamento, na função de umidificador, a água do reservatório é levada pela ação da bomba para o topo do resfriador para formar uma superfície molhada ao longo do painel evaporativo. O painel evaporativo é poroso, tipo colméia, que garante uma grande área superficial de contato ar-água para

aumentar a troca de calor entre os fluidos. Simultaneamente, o ventilador siroco produz o escoamento de ar que atravessa o painel molhado com transferência de calor e massa entre o ar e água provocando o resfriamento do ar e aumento da umidade relativa do ar. As posições dos sensores utilizados no experimento para medição de temperatura e umidade do ar e medição de temperatura da água são mostradas na Fig.2, onde Tar1, Tar2, Tar3 e Tar4 representam as temperaturas na entrada do climatizador, após o painel evaporativo, após o ventilador e na saída do climatizador, respectivamente; Tágua1, Tágua2 e Tágua3 representam as temperaturas dentro do reservatório de água, na parte inferior do painel evaporativo e na parte superior do painel evaporativo, respectivamente; e Tpainel é a temperatura no centro do painel evaporativo. Enquanto que, UR1 e UR2 representam a umidade relativa na entrada e saída do climatizador, respectivamente.

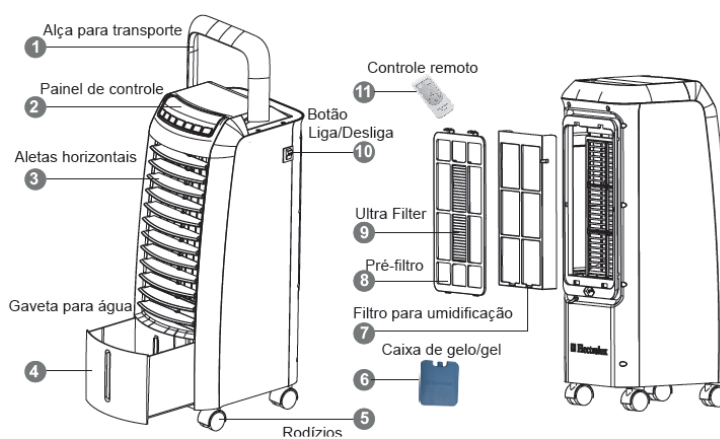


Figura 1 – Climatizador de ar CL07F ELECTROLUX (extraído do Manual do equipamento).

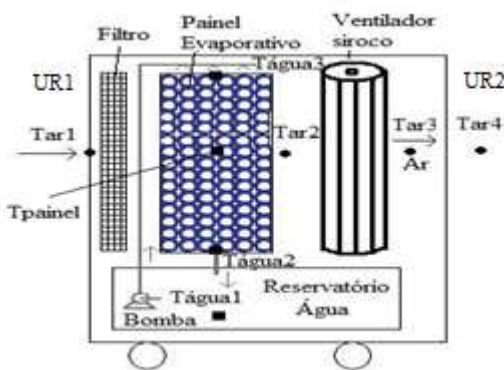


Figura 2 – Diagrama esquemático do experimento.

O Termômetro digital TH-096 da Instrutherm foi utilizado para medição das temperaturas do ar e da água no interior do climatizador conforme mostrado na Fig. 3. As características do instrumento são: display de LCD de 5 dígitos; Sensor: Termopar Tipo K; Escala: $-199,9^{\circ}\text{C}$ a $999,9^{\circ}\text{C}$; precisão de $\pm (0,5\% + 1^{\circ}\text{C})$; Resolução: $0,1^{\circ}\text{C}$; Canais de entrada: 4 canais, T1, T2, T3 e T4; Tempo de resposta: Aprox. 1 segundo; Interface Serial: RS-232; Data logger até 16000 dados; O termopar tipo K S-02K da Instrutherm utilizado pode ser visto também na Fig. 3.

O Datalogger HT-500 da Instrutherm foi utilizado para medição da temperatura e umidade relativa do ar na entrada e saída do climatizador conforme mostrado na Fig. 3. As características do instrumento utilizado são: Indicação através de dois LEDs; Escala: Umidade: 0 a 100% RH; Temperatura: -40 a 70°C ; Precisão: Umidade: $\pm 3\%$ RH; Temperatura: 1°C (-20 a 50°C); Resolução: $0,1\%$ RH / $0,1^{\circ}\text{C}$; Ciclo de medição selecionável: 2s, 5s, 10s, 30s, 1min, 5min, 10min, 30min, 1h, 2h,

3h, 6h, 12h, 24h; Interface USB; Memória: 16000 leituras para temperatura e 16000 leituras para umidade relativa.

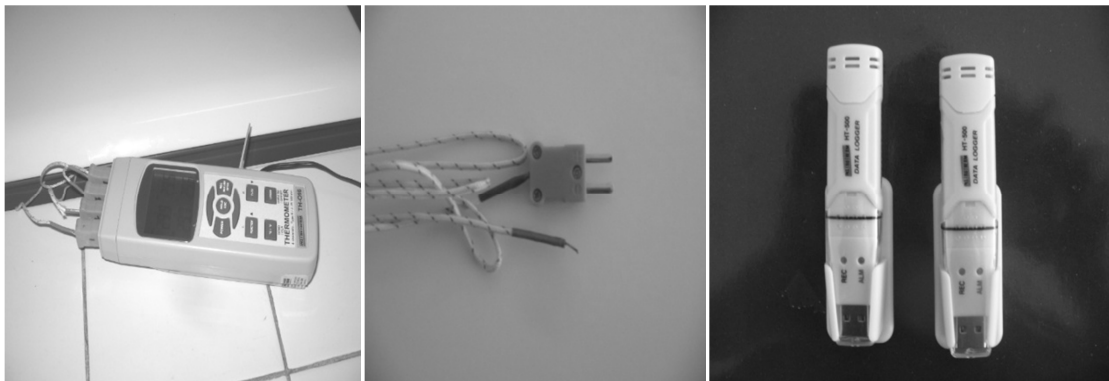


Figura 3 – Termômetro Digital TH-096, Termopar Tipo K S-02K e Datalogger de Temperatura e Umidade HT-500

O procedimento de aquisição de dados do termômetro TH-096 para o notebook foi realizado a partir da instalação de dois softwares. O 1º software referiu-se a um conversor de RS-232 para USB CRS-80 e o 2º software DL2005 para descarregamento dos dados da memória do instrumento.

O Software DL2005 da Instrutherm foi instalado com sucesso em um notebook, resultando em um arquivo de dados gerado em formato tipo dat que pode ser lido em editores de texto ou planilha de dados. Foi elaborado um programa de computador em linguagem forthan e posteriormente utilizado um software para visualização e geração de gráficos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa fase da pesquisa, foi realizado um único experimento para analisar a transferência de calor e massa através do levantamento do perfil de temperatura do ar e da água dentro do climatizador fazendo a medição com 4 sensores termopares tipo K ligados a um Termômetro TH-096 com gravação de dados a cada 15 segundos.

Na Figura 4 foi observado o comportamento da temperatura sobre o painel evaporativo posicionando os sensores na parte superior do painel em contato com a água bombeada, parte central interna do painel, após o painel e parte inferior do painel para retorno da água não evaporada, utilizando Tágua3, Tpanel, Tar2 e Tágua2, respectivamente, conforme nomenclatura adotada na Fig.2. Inicialmente, foram colocados cerca de 6 litros de água resfriada a 16 °C na gaveta do reservatório e ligado o climatizador na função “ventilar” por cerca de 20 minutos. Nessa etapa, observou-se que os sensores no painel tiveram uma pequena variação em torno de 30 °C, pois não houve bombeamento de água para superfície evaporativa. Pode-se observar que ao ligar o termômetro TH-096, apenas o sensor Tar2 mediu uma temperatura inferior a 30 °C devido à convecção natural entre o reservatório de água resfriada e o ar após o painel evaporativo dentro do climatizador, após a ação do ventilador siroco predominou a convecção forçada sobre o escoamento do ar resultando em temperaturas muito próximas nos quatro sensores. Posteriormente, foi ligado o equipamento na função “umidificar” fazendo a água resfriada ser bombeada até o painel evaporativo ocorrendo entre 20 e 60 minutos, a diminuição rápida da temperatura nos sensores Tágua3 e Tágua2, pois estão diretamente em contato com a água de circulação. A temperatura no sensor Tpanel não diminui muito porque troca calor e massa com a corrente de ar mais quente que a água provocando a evaporação de parte da água e diminuindo a temperatura do ar após o painel como mostrado pelo sensor Tar2. Em seguida, entre 60 e 120 minutos, a água atinge a temperatura de bulbo úmido do ar como mostrado no sensor Tágua3. Enquanto que Tágua2 é pouco maior que Tágua3, pois parte da água evaporou e parte do calor sensível do ar aqueceu a água circulante. Enquanto que, a temperatura do ar no sensor Tar2 é reduzida em relação à temperatura de entrada do ar no climatizador e próxima a temperatura no painel

provocando o resfriamento evaporativo do ar. Finalmente, após 120 minutos, a função “umidificar” é desligada provocando um crescimento rápido da temperatura no ar de saída e temperatura na parte superior do painel evaporativo, pois não há mais circulação de água a temperatura de bulbo úmido. No entanto, ainda há evaporação da água concentrada no painel, diminuindo ainda a temperatura no sensor Tpanel e crescimento lento da temperatura no sensor Tágua2 pelo motivo de ainda restar uma quantidade de água na parte inferior do painel evaporativo e possível influência da convecção natural do reservatório de água próximo a instalação do sensor Tágua2.

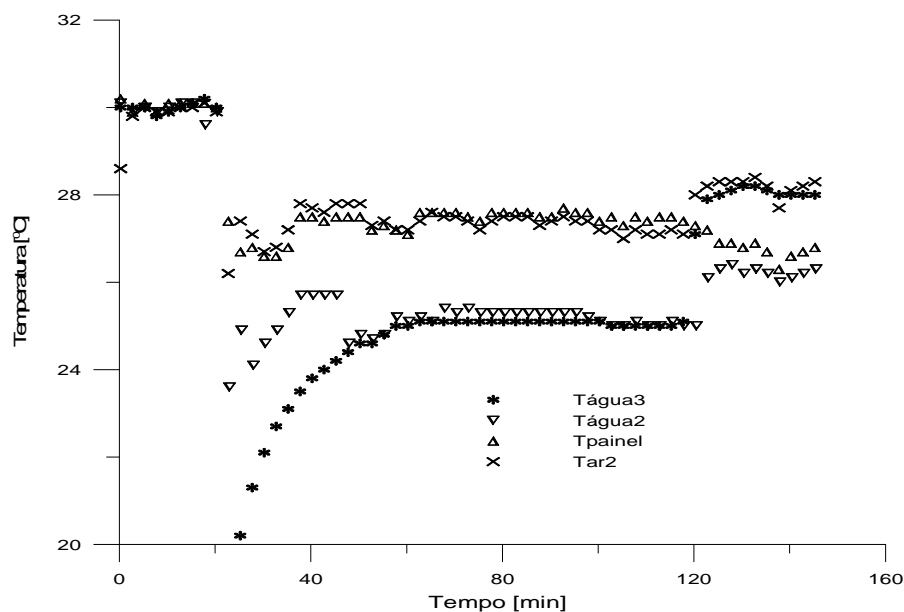


Figura 4 – Perfil de temperatura dentro do climatizador – água resfriada a 16 °C.

Em seguida, foram realizados experimentos para analisar o perfil de temperatura do ar e da água dentro do climatizador fazendo a medição com 8 sensores termopares tipo K ligados a dois Termômetro TH-096 com gravação de dados a cada 15 segundos.

Na Figura 5 foi observado o comportamento da temperatura do ar, da água e sobre o painel evaporativo posicionando os sensores para medição do ar na entrada do climatizador, após o painel evaporativo, após o ventilador siroco e na saída do climatizador; para medição da água dentro do reservatório, na parte superior do painel em contato com a água bombeada e na parte inferior do painel para retorno da água não evaporada e medição no centro da superfície evaporativa utilizando Tar1, Tar2, Tar3, Tar4, Tágua1, Tágua3, Tágua2 e Tpanel, respectivamente, conforme nomenclatura adotada na Fig.2. Inicialmente o ar na entrada do climatizador estava em torno de 30 °C e colocados cerca de 6 litros de água resfriada a 17 °C foi observado o comportamento da temperatura do ar, da água e do painel evaporativo. Ao ligar, o climatizador na função “ventilar” por cerca de 20 minutos. Nessa etapa, observou-se que todos os sensores tiveram uma pequena variação em torno de 30 °C, pois não houve bombeamento de água para superfície evaporativa, exceto o sensor Tágua1 que foi instalado dentro do reservatório de água permanecendo com a temperatura inferior a 20 °C. Posteriormente, foi ligado o equipamento na função “umidificar” fazendo a água resfriada ser bombeada até o painel evaporativo ocorrendo entre 20 e 60 minutos, a diminuição rápida da temperatura nos sensores Tágua1, Tágua2 e Tágua3, devido à troca de calor sensível água e ar. A temperatura no sensor Tpanel não diminui muito porque troca calor e massa com a corrente de ar mais quente que a água provocando a evaporação de parte da água e diminuindo a temperatura do ar após o painel como mostrado pelo sensor Tar2. Em seguida, entre 60 e 120 minutos, a água atinge a temperatura de bulbo úmido do ar como mostrado nos sensores Tágua1, Tágua2 e Tágua3. Enquanto que, as temperaturas do ar nos sensores Tar2, Tar3 e Tar4 são reduzidas em relação à temperatura de

entrada do ar no climatizador (Tar1). No entanto, apenas Tar2 fica próxima a temperatura no painel. Finalmente, após 120 minutos, a função “umidificar” é desligada provocando um crescimento rápido da temperatura do ar e da água no painel evaporativo, diminuição da temperatura no sensor Tpanel e crescimento lento da temperatura no sensor Tágua2 como relatado no experimento anterior.

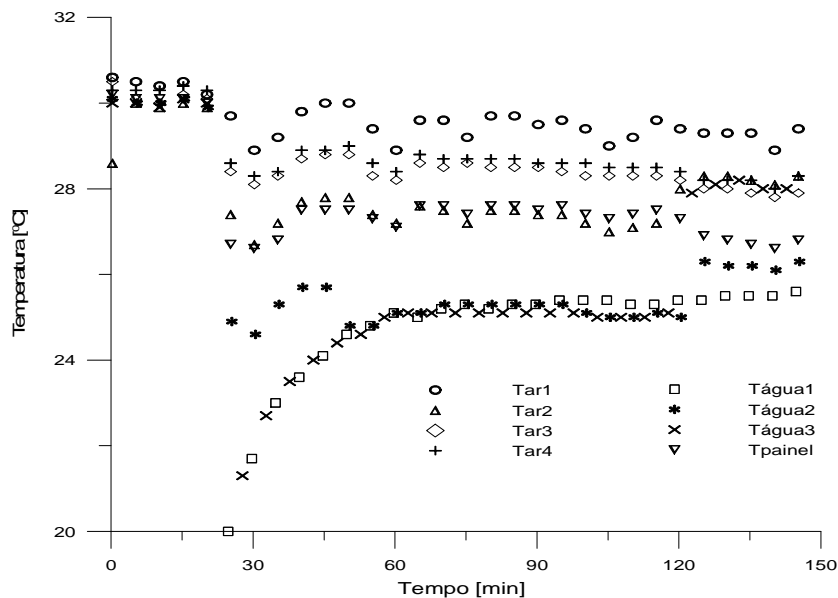


Figura 5 – Perfis de temperatura dentro do climatizador – água resfriada a 17 °C

Na Figura 6 foi observado o comportamento da temperatura do ar, da água e sobre o painel evaporativo para outra situação. Inicialmente o ar na entrada do climatizador estava em torno de 31 °C e colocados cerca de 6 litros de água resfriada a 24 °C na gaveta do reservatório e ligado o climatizador na função “umidificar” fazendo a água resfriada ser bombeada até o painel evaporativo ocorrendo aumento da temperatura da água na posição do sensor Tágua1 cerca de 2 °C, e nos sensores Tágua2, Tágua3 e Tpanel entre 1 e 1,5 °C até atingir a temperatura de bulbo úmido após 30 minutos. Simultaneamente, ocorreu a diminuição da temperatura do ar, devido à transferência de calor e massa com a água de circulação. O ar próximo ao painel evaporativo via sensor Tar2 tem um abaixamento maior de temperatura em relação aos sensores Tar3 e Tar4 que estão mais distantes da superfície onde ocorre o resfriamento evaporativo. Até 30 minutos, observa-se claramente a ação benéfica da introdução da água resfriada através da troca de calor sensível entre a água e ar. Após 30 minutos, a água sobre a superfície evaporativa atingiu a temperatura de bulbo úmido do ar predominando o resfriamento evaporativo. No entanto, foi observado um acréscimo significativo da temperatura do ar nos sensores Tar3 e Tar4 em relação à temperatura no sensor Ta2 mostrando que não há uma boa troca de calor e isso compromete o desempenho do equipamento.

Na Figura 7 foi testada outra situação para o climatizador partindo de uma condição ambiental de 28 °C e colocados cerca de 6 litros de água refrigerada a 7 °C e duas caixas de gel refrigeradas dentro da gaveta do reservatório para manter maior tempo da água refrigerada. Ao ligar, o climatizador na função “umidificar” fazendo a água refrigerada ser bombeada até o painel evaporativo ocorreu aumento da temperatura nos sensores de água até atingir a temperatura de bulbo úmido após 90 minutos. Simultaneamente, ocorreu a diminuição da temperatura do ar, devido à transferência de calor e massa com a água de circulação. O ar próximo ao painel evaporativo via sensor Tar2 tem um abaixamento maior de temperatura em relação aos sensores Tar3 e Tar4 que estão mais distantes da superfície onde ocorre o resfriamento evaporativo. Em relação ao experimento sem caixas de gel, observa-se comportamento similar de temperatura e maior tempo da água refrigerada sem atingir a temperatura de bulbo úmido do ar o que poderia acarretar em um desempenho melhor. No entanto, observa-se o mesmo problema dos experimentos anteriores, pois há uma diferença considerável na

saída do equipamento em relação ao ar após o painel evaporativo.

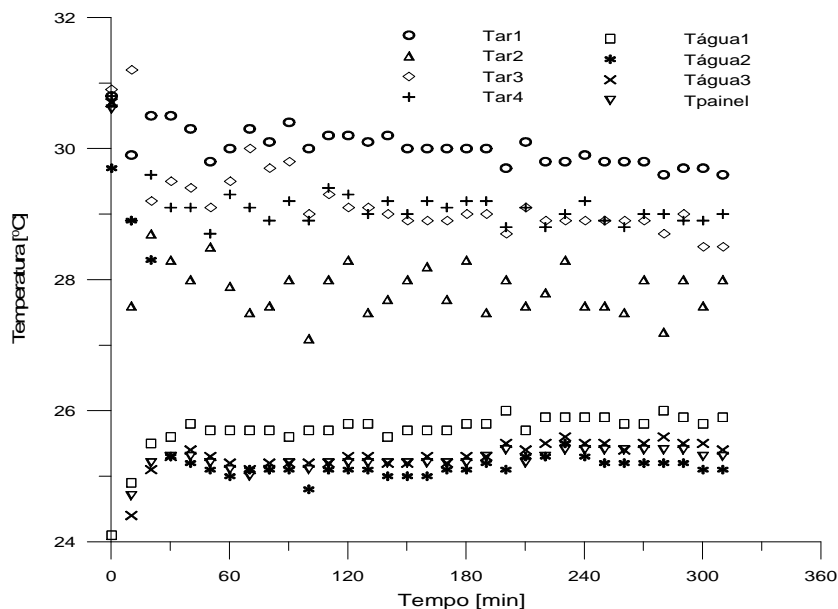


Figura 6 – Perfis de temperatura dentro do climatizador – água resfriada a 24 °C

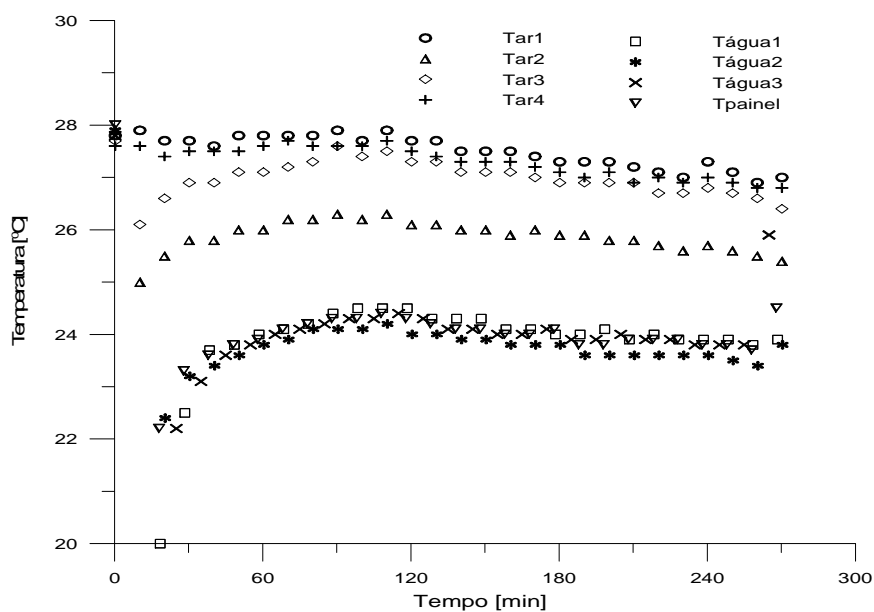


Figura 7 – Perfis de temperatura dentro do climatizador – água resfriada a 7 °C

Na Figura 8 foi testada situação similar para o climatizador partindo de uma condição ambiental de 27.5 °C e colocados cerca de 6 litros de água refrigerada a 6 °C e duas caixas de gel congeladas dentro da gaveta do reservatório para manter maior tempo da água refrigerada. Ao ligar, o climatizador na função “umidificar” fazendo a água refrigerada ser bombeada até o painel evaporativo ocorreu aumento da temperatura nos sensores de água até atingir a temperatura de bulbo úmido após 90 minutos, ou seja, comportamento térmico semelhante ao experimento anterior.

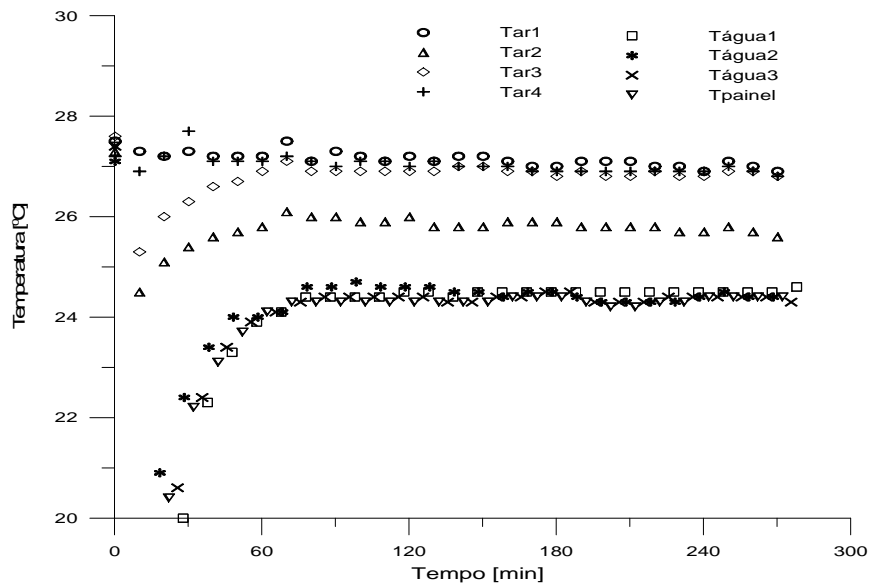


Figura 8 – Perfis de temperatura dentro do climatizador – água resfriada a 6 °C

Em todos os experimentos realizados conforme dados retirados dos termohigrometros partiu-se de umidade relativa de entrada (UR1) superior a 65 % e inferior a 75% e umidade relativa de saída (UR2) superior a 72% e inferior a 83%. Foi calculada a efetividade de resfriamento para cada caso experimentado utilizando os dados obtidos pelos termômetros e termohigrômetros na entrada e saída com leituras de instrumentos no tempo de 150 minutos resultando em rendimentos inferiores a 20 %.

6. CONCLUSÕES

O processo de resfriamento evaporativo em um climatizador com painel evaporativo foi investigado, a partir da medição de temperatura e umidade relativa, para análise das condições do ar, da água e do painel evaporativo. Os resultados mostraram que o equipamento não funciona bem quando utilizado em regiões de clima quente e úmido, pois o efeito de resfriamento, na saída do climatizador, é pouco significativo para efeitos de climatização. Para regiões com essas condições climáticas, o equipamento serve apenas como sistema de ventilação. O efeito de umidificação é indesejável para regiões que apresentam elevadas umidades.

REFERÊNCIAS

- CAROSI, G.A.B. **Resfriamento evaporativo: Estudo do potencial de sua aplicação no Brasil**. Tese de mestrado, Uberlândia: UFU, 110p, 2006.
- FOUDA, A.; MELIKYAN, Z., **A simplified model for analysis of heat and mass transfer in a direct evaporative cooler**. Applied Thermal Engineering, v. 31, p. 932-936, 2011.
- SANTOS, J.C.; MEDEIROS; J.M; DOS SANTOS, J.C.; GURGEL, J.M.; MARCONDES, F., **Analytical solution for the simultaneous heat and mass transfer problem in air washers**. International Journal of Refrigeration, v. 34, p. 353-361, 2011.
- SHENG, C.; AGWU NNANNA, A.G., **Empirical correlation of cooling efficiency and transport phenomena of direct evaporative cooler**. Applied Thermal Engineering, v. 40, p. 48-55, 2012.
- WU, J.M.; HUANG, X.; ZHANG, H., **Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler**. Applied Thermal Engineering, v. 29, p. 980-984, 2009.