

DESENVOLVIMENTO, ESTUDO, MODELAGEM MATEMÁTICA E CARACTERIZAÇÃO DO RESFRIADOR EVAPORATIVO DOTADO DE ATOMIZADOR, COMPARADOS A MODELOS CONVENCIONAIS.

Andrei Hudson Guedes Braga - andrei_projetos@yahoo.com.br

Cleonildo Soares Braga - cleonildosoares@ipojuca.ifpe.edu.br

Diógenes Linard Aquino Freitas - diogeneslinard@ipojuca.ifpe.edu.br

Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia PE 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca – PE

Jesus Marlinaldo de Medeiros - jesus_medeiros@yahoo.com.br

Instituto Federal da Paraíba, Rodovia Br 230, Centro, Cabedelo – PB

Daniel de Filgueiras Gomes - daniel.filgueiras@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, Cidade Universitária, Recife – PE

Edite Maria dos Anjos - edite.anjos2013@hotmail.com

Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia PE 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca – PE

A1 – Aplicações para Conforto

Resumo. *O crescimento populacional impõe altas taxas de produção e consumo de energia elétrica, bem como o aumento da degradação do Meio Ambiente. Essas condições direcionam pesquisas para o desenvolvimento de máquinas e equipamentos mais eficientes. Outras pesquisas são realizadas com o intuito de criar sistemas alternativos aos existentes, apresentando menor consumo de energia e que possam produzir um impacto positivo ao Meio Ambiente. Os equipamentos de climatização representam sistemas caracterizados por apresentarem alto consumo, bem como por influenciar na degradação da camada de Ozônio e efeito estufa. Os fluidos refrigerantes do tipo CFC influenciam diretamente na camada de Ozônio, enquanto os fluidos alternativos dos HFC, especialmente o R 407 C e o R 410 A, influenciam no efeito estufa e, conseqüentemente, no aquecimento global. Um sistema alternativo aos condicionadores do ciclo de compressão de vapor, quando utilizados em regiões quentes e secas, pode ser o resfriador evaporativo. Esse sistema realiza troca de calor sensível e latente, podendo apresentar bons resultados nas regiões citadas, como no interior do Nordeste brasileiro. Além de proporcionar um clima mais ameno, o resfriador evaporativo apresenta baixo consumo de energia elétrica e pode apresentar baixo custo de aquisição. Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um novo modelo de resfriador evaporativo, diferindo do modelo comercial por não possuir aletas. O novo modelo também é dotado de um atomizador, constituído por um disco dentado acoplado a um motor, cuja função é a de quebrar a molécula da água e pulverizá-la, possibilitando uma maior e mais rápida absorção da água pela corrente de ar. O sistema desenvolvido será testado e comparado com outros tipos mais convencionais de resfriador evaporativo. Para isso foi criado um protótipo, em escala laboratorial, tendo sido instrumentado e preparado para monitorar as temperaturas e umidades do ar na entrada e na saída do protótipo, bem como um sensor de temperatura para a água. Os experimentos serão realizados para diferentes condições climáticas, possibilitando a modelagem matemática em várias condições*

Palavras-chave: resfriador evaporativo; modelo com atomizador; redução do consumo de energia.

1. INTRODUÇÃO

O nosso planeta está em permanente transformação, que se acentua a cada ano e cujos efeitos são visíveis. O crescimento da população global impõe altas taxas de degradação ao meio ambiente, bem como alto consumo das nossas reservas naturais, especialmente nas sociedades cujo crescimento acontece de forma desorganizada. Os nocivos efeitos dessa dinâmica de crescimento se acumulam e faz com que o planeta enfrente problemas cada vez maiores. Dois dos problemas que mais preocupam e cujo debate tem sido muito intenso, estão relacionados ao consumo de energia elétrica e os efeitos da liberação de gases nocivos na camada de Ozônio, o que resulta no crescimento do interesse no desenvolvimento ou melhoramento de sistemas alternativos cujas características sejam o baixo consumo de energia elétrica e a não agressão da natureza. Seguindo essa linha de raciocínio é possível encontrar um relevante número de pesquisas direcionadas a minimizar esses efeitos, cujos resultados desejados são o desenvolvimento de sistemas, processos e equipamentos com melhores rendimentos.

Apesar do cenário que se apresenta, a sociedade moderna se utiliza cada vez mais de equipamentos que possuem características de alto consumo, que agredem a natureza, e que outrora foram considerados artigos de luxo, mas que atualmente são itens de necessidade básica. Sob essa ótica, é possível observar diversos tipos de sistemas que apresentam alto consumo, todavia, nenhum outro tem ganho tanto destaque quanto os equipamentos destinados a climatização e a refrigeração. Os climatizadores de ambientes, refrigeradores, umidificadores e desumidificadores, utilizados para fins domésticos, são cada vez mais solicitados, no entanto, também na área industrial os sistemas de climatização e refrigeração apresentam altas taxas de crescimento. Em algumas atividades, para melhorar a qualidade dos produtos fabricados, é necessário que setores inteiros no chão de fábrica sejam climatizados, tal como as indústrias de fios, onde o controle das condições climáticas é obrigatório para garantir um padrão de qualidade (Braga, 2010). Para garantir a qualidade de alguns produtos é necessário a aplicação de resfriamento rápido, bem como a armazenagem em ambientes cli-

matizados, além disso, o crescente aumento da produção implica diretamente no aumento do consumo de energia por parte desses sistemas.

As consequências da massificação da utilização de equipamentos, sobre o Meio Ambiente, constituem outro problema a ser resolvido. Intimamente relacionada a graves problemas como a própria crise energética e o desequilíbrio ambiental, tem supostamente provocado vários fenômenos, tais como El Nino e La Nina. Um dos graves problemas que contribuem para o desequilíbrio ambiental é a liberação de gases tóxicos na atmosfera, o que ocasiona a destruição da camada de Ozônio e também o efeito estufa. Os gases que mais agredem a camada de Ozônio são os chamados HCFC (Hidroclorofluórcarbono) e o CFC (Clorofluórcarbono) usados em sistemas de condicionamento e refrigeração convencionais (sistemas de compressão de vapor) de pequeno, médio e grande portes em todo o mundo. Segundo Sagan (1998), o cloro do CFC é o responsável pela destruição da camada de Ozônio, e consta que um átomo de cloro pode destruir cerca de cem mil moléculas de Ozônio. A molécula de CFC pode durar aproximadamente 100 anos na atmosfera. É esse tempo que os raios UV levam para romper o átomo de cloro da molécula de CFC e levá-lo de volta para a camada mais baixa da atmosfera eliminando-o na água da chuva. O Ozônio é a nossa única proteção contra os raios ultravioletas do Sol. Se todo o Ozônio na camada superior estivesse a pressão e temperatura do nível do mar, a camada teria aproximadamente 3 milímetros de espessura.

O desenvolvimento de novos sistemas, bem como o aperfeiçoamento do desempenho de sistemas existentes, constitui o principal desafio dos pesquisadores no sentido de criar sistemas condizentes com a nossa atual realidade. O preceito de que é preciso utilizar energia de forma racional e ainda preservar o meio ambiente, dentro dessa nova consciência mundial, pode nos levar direto aos sistemas de climatização por compressão de vapor. Tais sistemas têm sido utilizados diariamente e em larga escala, para fins residenciais, comerciais e industriais. Estima-se que nos Estados Unidos cerca de 50 % da energia elétrica residencial consumida diariamente seja usada para fins de climatização, resfriamento e aquecimento (Shelton, 1984). Estes equipamentos de refrigeração e ar condicionado são responsáveis por grande parte da energia consumida, principalmente nas cidades de médio e grande portes, das regiões de clima tropical. Além do alto consumo, outra grande desvantagem é a liberação de gases HCFC e CFC para a atmosfera quando da troca de fluido, seja por dano no compressor, corrosão em tubulações ou até mesmo pelo entupimento de um filtro de líquido. Na prática há um aumento significativo, ano a ano, no uso de sistemas de compressão de vapor, o que pode levar a um colapso, tanto energético quanto ambiental. Os equipamentos de climatização mais novos já utilizam gases considerados ecológicos, tais como os hidro fluórcarbono (HFC) tipo o R – 407 C e o 410 A. Dentre esses equipamentos destacam-se os de fluxo de refrigerante variável (VRF), que além de utilizarem o fluido 410 A, também trabalham com a variação de rotação do compressor em função da carga térmica solicitada em cada instante, o que na prática representa uma redução no consumo total de energia. Todavia, equipamentos com tecnologia VRF apresentam custos de aquisição e instalação muito altos em relação aos condicionadores cujos compressores apresentam rotação fixa.

A necessidade de se repensar sobre o modelo atual tem incentivado a realização de pesquisas em todo o mundo, com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica e promover um impacto ambiental positivo. Pesquisas com sistemas de climatização por absorção, resfriamento evaporativo e resfriamento dessecante estão sendo realizadas em todo o planeta e com maior intensidade. Estes sistemas proporcionam redução no consumo de energia elétrica e não usam gases nocivos ao ambiente como fluido de trabalho. Os sistemas alternativos passaram a ficar em evidência principalmente depois do protocolo de Kioto, que tratou dos efeitos dos clorofluorcarbonetos e dos hidroclorofluorcarbonetos sobre a camada de Ozônio, e decidiu em uma primeira etapa pelo fim do uso dos cfc a partir de 1995 e do hcfc ,em uma segunda etapa, até 2015 (Pons et. al, 1999). Com a ratificação do protocolo de Kioto os sistemas alternativos de refrigeração e ar condicionado passaram a ser mais explorados, dos quais os sistemas de resfriamento dessecante têm sido muito desenvolvidos, particularmente, nos Estados Unidos e Austrália. Na tentativa de estabelecer um paralelo, os rendimentos dos ciclos alternativos têm sido constantemente comparados, tal como no trabalho de Mashuri et. al (1999), que fizeram uma comparação entre os sistemas de resfriamento dissecantes e os ciclos de resfriamento por compressão de vapor. A partir dos modelos matemáticos e da análise dos coeficientes de performance (COP) térmicos e elétricos, os autores conseguem estabelecer parâmetros de eficiência e viabilidade técnica e econômica. Outros pesquisadores, como Meunier et al (1996), tentaram fazer comparações a outros ciclos, fazendo uma equivalência do ciclo Carnot para refrigeração por adsorção.

Alguns dos sistemas alternativos que têm sido mais explorados são os de resfriamento evaporativo e os compostos por rotores dessecantes, que utilizam apenas água e ar como fluidos de trabalho, não trazendo riscos para o meio ambiente, bem como apresentando reduzidos consumos de energia elétrica, além disso, não trabalham com compressores ou com tubulações, que são fontes de corrosão e de constantes manutenções preventiva e corretiva. A proposta básica dos resfriadores dessecantes é o tratamento do ar a partir da modificação das umidades relativas e absolutas na entrada e saída do processo, enquanto nos sistemas convencionais de compressão de vapor, a temperatura do ar é tratada e as umidades são decorrência deste tratamento. No resfriamento dessecante ocorre o contrário, as umidades são tratadas e a temperatura de saída decorre deste tratamento. A secagem do ar, através de uma roda de sílica gel, é a primeira etapa do processo, seguido de uma etapa intermediária que consiste na troca de calor em um condensador, e por fim a reumidificação deste ar em um resfriador evaporativo. A intenção é que a sequência destas etapas proporcionem um ar tratado e capaz de levar e manter um ambiente dentro da zona de conforto térmico estabelecida na carta psicrométrica. A capacidade de manter temperatura e umidade dentro da zona de conforto térmico é uma característica importante, uma vez que os ciclos de compressão de vapor nem sempre conseguem manter uma umidade desejada (Braga, 2003). Os sistemas de condicionamento de ar por adsorção podem ser usados em diversos ambientes. Rane et. al (1999) propuseram um sistema de resfriamento adsorção para climatização dos espaços internos de um ônibus da Índia. Eles modelaram e analisa-

ram um ciclo de ar condicionado adsorptivo, usando os rejeitos térmicos dos gases de escapamento como fonte de calor para reativar o sistema. Eles estimaram que um ônibus com carga térmica de 7 TR (84.000 BTU/H) consome aproximadamente 1,2 litros de diesel por hora de operação. Este veículo tem rendimento de cerca de 35 %, ou seja, 65 % de energia é rejeitada na forma de calor, tanto pelo escape quanto pelas trocas no radiador. A proposta é que cerca de 1/3 do calor rejeitado seja recuperado para criar um novo ciclo alternativo de climatização.

Um sistema alternativo para climatização, que tem sido usado em um grande número de aplicações em regiões quentes e secas, é o que realiza o processo de resfriamento evaporativo. Segundo Yamane (1998), este foi o primeiro sistema de climatização, tendo sido desenvolvido em meados do século XIX. Esta técnica pode ser usada combinada à ventilação natural e a ventilação forçada, tanto para redução da temperatura (processo de diminuição do calor sensível) quanto para umidificar o ar (processo de aumento do calor latente). Wiersma et. al (1983), apresentaram um trabalho deste processo destinado a agricultura, analisando as relações de velocidade, temperatura e umidade do ar, e relataram o aumento da produção em função da climatização com baixos custos de montagem e operação. Eles mostraram ainda a facilidade de montagem de tal sistema aplicado ao aumento da produção de ovos, leite, e outros. Omtvedt et al (1971) e Buffington et al (1978) trataram da influência da climatização, por resfriamento evaporativo, na vida das pessoas, tendo Omtvedt (1971) dado enfoque a redução da fadiga em decorrência da redução da temperatura do ar. Kluppel e Leite (1989) no trabalho intitulado *Performance of a roof pond in a hot humid climate*, trataram do desempenho da climatização usando uma caixa de água coberta, enquanto Leite e Kluppel (1993) mostraram um sistema de climatização usando uma piscina como resfriador passivo, e Filippin et. al (1998), apresentaram um trabalho desenvolvido na província de La Pampa na Argentina, uma região de clima semi-árido. A técnica de resfriamento evaporativo foi aplicada a um prédio de 350 m² de área. Resultados obtidos em dois anos de experiências foram mostrados. Soares et al (2006), desenvolveram um modelo de resfriador evaporativo contendo canais em pvc e formando uma cortina de água. Eles calcularam a eficiência de umidificação em 47,6%, com decréscimos de temperatura de 3 a 4 °C e aumento da umidade entre 10 e 12 %. Masiero (2006), apresenta um estudo experimental com um resfriador evaporativo comparado a um condicionador de ar por compressão de vapor. As respostas das temperaturas e umidades são analisadas.

Segundo Freitas (2007), a eficiência de um sistema de resfriamento evaporativo varia de acordo com as condições do clima, sendo mais eficiente em dias quentes e secos. O consumo de energia elétrica desse sistema chega a ser, dependendo das condições climáticas do ar externo, de 40% a 80% menor do que o consumo de um sistema de condicionamento de ar por compressão.

O efeito do resfriamento evaporativo ocorre em painel evaporativo de fibra natural ou sintética, que pode ser de celulose, fibra de vidro, fibra de madeira, entre outros materiais (Medeiros et al, 2015). No intuito de melhorar a eficiência dos resfriadores, diferentes materiais e disposições foram testados. Alodan e Al-Faraj (2005) utilizaram folhas metálicas galvanizadas. A chapa foi disposta em zigue zague e os painéis testados com 15 cm, 30 cm e 45 cm. As eficiências encontradas foram de 76%, 86% e 88%, respectivamente. Rawangkul et al (2008), desenvolveram painéis a partir da fibra de coco. Os painéis foram experimentados e avaliados em relação a transferência de calor, velocidade do ar, queda de pressão durante a passagem do ar e eficiência de resfriamento, depois os dados foram comparados aos de um painel de celulose rígida corrugada (papel kraft). Para velocidades de 1,88 m/s e 2,79 m/s, as eficiências ficaram em torno de 35% a 50%, enquanto o painel de celulose rígida apresentou 47%. A perda de pressão estática, resultante da passagem do ar pelos painéis, variou de 1,5 Pa e 5,1 Pa.

O resfriamento evaporativo, além de poder ser utilizado para climatização de ambientes em regiões quentes e secas, são usados também nos sistemas de climatização com rotor dessecante, correspondendo a última etapa, ou seja, é responsável pela umidificação do ar na saída do equipamento e, conseqüentemente, pela redução da temperatura de bulbo seco.

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um novo modelo de resfriador evaporativo, onde a água é pulverizada em uma fina camada, através da atomização da molécula. Para tanto, foi montado um protótipo contendo o conjunto motor, eixo e um disco dentado, que tem a função de atomizar a molécula. O protótipo possui ainda bomba de circulação da água e ventilador. Paralelamente, foi instalado um resfriador evaporativo comercial, de onde serão coletados dados para serem comparados aos do modelo proposto. Pretende-se mostrar que a eficiência na transferência de calor e massa do modelo proposto é maior que os modelos comerciais. Também serão desenvolvidos modelos matemáticos identificados, a partir dos experimentos. Os modelos serão validados e poderão ser utilizados para o desenvolvimento de sistemas de controles clássicos e modernos.

2. RESFRIADOR EVAPORATIVO

Nessa seção serão apresentados os resfriadores evaporativos utilizados, ou seja o equipamento comercial e o proposto, montado como protótipo. Também serão apresentadas as metodologias para aquisição dos dados dos experimentos.

O sistema de resfriamento evaporativo produz uma redução da temperatura de bulbo seco do ar, ao mesmo tempo em que aumenta a umidade. Para isso é necessário que uma massa de água seja pulverizada na corrente de ar, resultando na evaporação de parte dessa água. A temperatura da água deverá ser maior que a do ponto de orvalho, para cada condição.

2.1 Experimento

Os experimentos foram realizados em ambiente laboratorial, com temperaturas do ar controladas. Os modelos proposto e comercial foram experimentados sob as mesmas condições e ao mesmo tempo. A figura 1 mostra o sistema de resfriamento evaporativo comercial. Esse modelo apresenta aletas frontais direcionadoras, painel de controle com as funções umidificar, brisa, ventilar, purificar, dormir e timer. Também apresenta reservatório de água removível, filtro de ar e painel evaporativo.



Figura 1. Resfriador Evaporativo Comercial

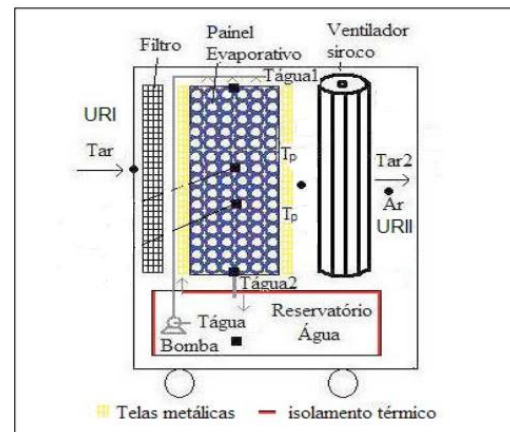


Figura 2. Desenho Esquemático do Resfriador

A figura 2 apresenta um desenho esquemático do resfriador evaporativo comercial. É possível observar a entrada do ar, passando pelo filtro. Na sequência encontra-se o painel evaporativo, onde se processa a transferência de calor e massa. Nesse elemento o ar absorve, na forma de vapor, parte da água que circula no painel, aumentando o calor latente e reduzindo o calor sensível. A bomba, de modelo submersa, é a responsável pelo fluxo de água, ficando instalada no reservatório. O ventilador siroco é responsável pelo fluxo de ar.

Para a realização dos experimentos, com o sistema proposto, foi montado um protótipo em escala reduzida, sendo operado em laboratório. As figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 mostram o protótipo sendo montado, tanto as partes internas quanto as externas. A figura 3 mostra o exterior do protótipo montado, também a parte superior do protótipo, onde está instalado o conjunto de ventilação. A figura 4 mostra o interior do mesmo, sendo possível verificar a instalação de um sensor de temperatura para a monitoração da água do reservatório. Também é observa-se o reservatório, que fornece água a ser pulverizada na corrente de ar. Também é possível visualizar o conjunto de mangueiras conectadas, interligadas da bomba até a área central superior do resfriador evaporativo. A figura 5 apresenta a bomba e o medidor de fluxo, bem como as ligações. Existe ainda um sistema auxiliar constituído por um aquecedor tipo Peltier e dois resistores de fio de Cromo AWG 26 com resistência equivalente total de 15 ohms, ligado a uma fonte de 22 V e 1,46 A, resultando em 32,12 W de potência. A função desse conjunto é variar a temperatura da água na entrada do resfriador, simulando condições constantes de temperatura da água, quando essa solicitação for necessária. Na figura 6 observa-se o atomizador, constituído por motor elétrico isolado DC com eixo montado para baixo, ao qual foi conectado um disco com extremidade serrilhada. Esse conjunto é responsável por quebrar a gotícula de água, criando a névoa. A figura 7 mostra o arduino, que é responsável pela coleta dos dados dos sensores, bem como pela alimentação elétrica da bomba, ventilador e rotação do atomizador. O arduino é capaz de fazer variar as vazões de ar e água, bem como a rotação do atomizador, permitindo a otimização dos parâmetros. O sensor de temperatura e umidade AM2302 DHT22 pode ser visto na figura 8. Esse sensor possui resolução de 0,1 °C e 1% de umidade relativa.

O experimento foi realizado no ambiente laboratorial, com temperatura de bulbo seco e umidade do ar controlados, de forma a minimizar os efeitos das variações climáticas externas. Para tanto foram instalados sensores de temperatura e umidade no interior do laboratório, de forma a monitorar os parâmetros. Para iniciar o experimento o motor do ventilador foi acionado, provocando um fluxo de ar através do protótipo. O acionamento do motor fará com que o disco gire, no entanto sem que, inicialmente, a água circule.

O sistema foi montado com a bomba, o ventilador, o pulverizador e a estrutura de sustentação no formato de um resfriador evaporativo dispostos verticalmente. A fonte de alimentação dos PWMs foi ajustada para 13,5 volts, com corrente máxima de 1,06 A. Dessa forma, a potência foi de 14,31 W para a bomba, o atomizador e o ventilador. Para acionar o sistema, foi realizado um degrau máximo, dessa forma, o motor do ventilador foi acionado no instante determinado. Também nesse momento foi acionado o atomizador, que provoca a pulverização da água.

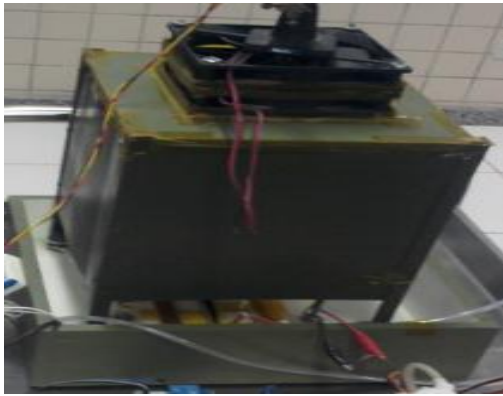


Figura 3. Resfriador Evaporativo - Protótipo

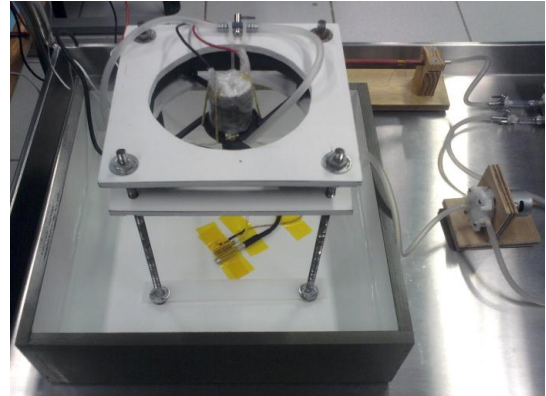


Figura 4. Interior do Resfriador, Sensor e Bomba

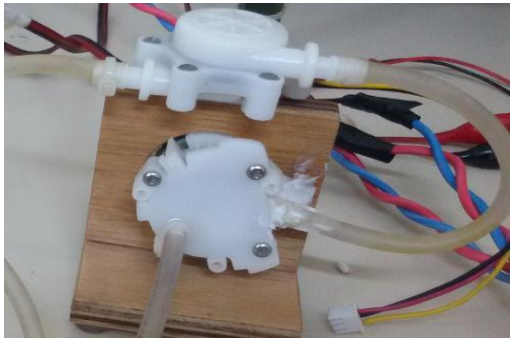


Figura 5. Bomba e Medidor de Fluxo



Figura 6. Atomizador: Motor Isolado e Disco

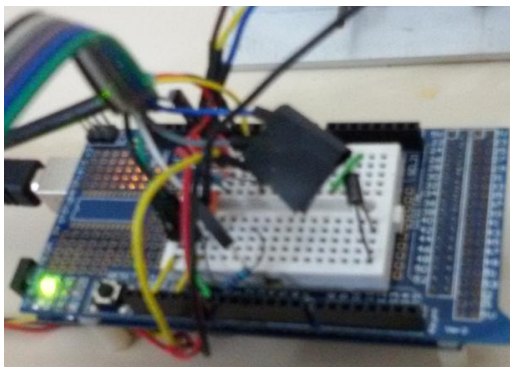


Figura 7. Montagem em Arduino

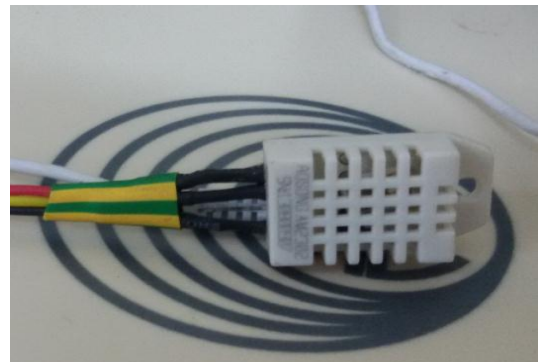


Figura 8. Sensor AM2302 DHT22

3. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos dos experimentos dos resfriadores evaporativos construído em laboratório (protótipo) e do comercial. Será possível verificar a capacidade de redução da temperatura de cada equipamento. Na seção seguinte serão apresentados os modelos matemáticos obtidos para o protótipo e para o resfriador comercial. Também será realizada a validação dos modelos utilizando as curvas experimentais e as realizadas a partir das equações identificadas.

3.1. Experimentos com o Protótipo e o Resfriador Comercial

Essa seção mostra as respostas dos experimentos com o protótipo e o resfriador evaporativo comercial. Para iniciar os experimentos, o condicionador de ar do laboratório foi acionado e ajustado para temperatura de 21° C, deixando o ambiente em equilíbrio em 22,5° C com 48% de umidade relativa. A partir de estabilização da temperatura dentro do ambiente é que foi dado início ao experimento dos resfriadores evaporativos. O protótipo e o resfriador evaporativo comercial foram experimentados para as mesmas condições.

O gráfico da figura 9 apresenta o resultado dos experimentos realizados para obtenção da variação de temperatura com o sistema proposto e o comercial.

A figura 10 apresenta a resposta da umidade relativa entre os dois resfriadores. Os dados foram coletados do mesmo experimento realizado para coleta de temperatura, apresentado na figura 9.

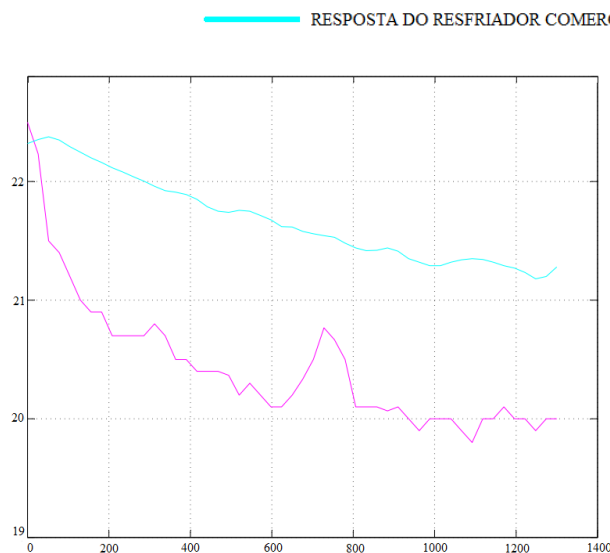


Figura 9. Variação de Temperatura dos Resfriadores Experimento 1

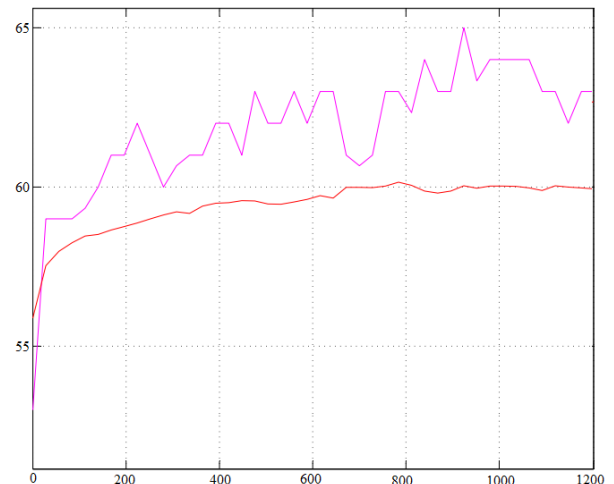


Figura 10. Variação de Umidade dos Resfriadores Experimento 1

Para o segundo experimento, o condicionador de ar do laboratório foi ajustado para temperatura de 23° C, deixando o ambiente em equilíbrio em 24,7° C com 53% de umidade relativa.

O gráfico da figura 11 apresenta o resultado dos experimentos realizados para obtenção da variação de temperatura com o sistema proposto e o comercial.

A figura 12 apresenta a resposta da umidade relativa entre os dois resfriadores. Os dados foram coletados do mesmo experimento realizado para coleta dos dados de temperatura, apresentado na figura 11.

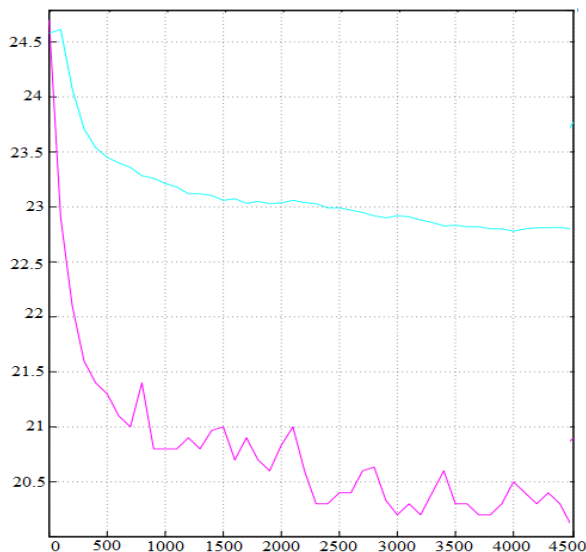


Figura 11. Variação de Temperatura dos Resfriadores Experimento 2

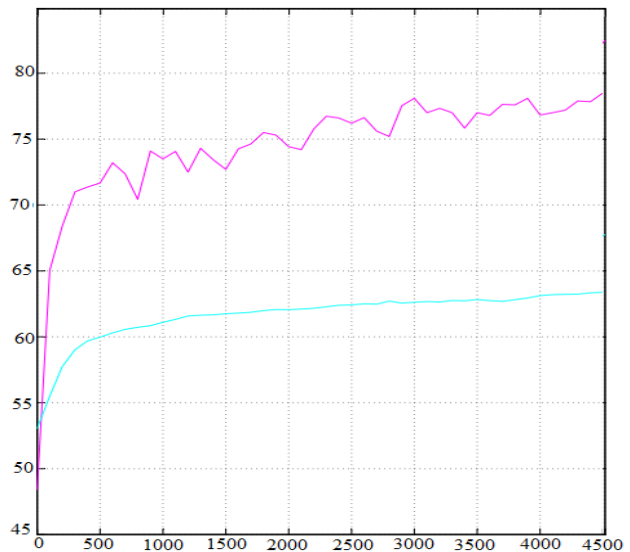


Figura 12. Variação de Umidade dos Resfriadores Experimento 2

A resposta da figura 9 mostra que a variação de temperatura do protótipo foi de aproximadamente 2,5° C, enquanto que a variação do resfriador evaporativo comercial foi de cerca de 1° C.

Na figura 10 é possível verificar que o acréscimo da umidade do protótipo é de aproximadamente 10%, passando de 53% para 63%. Para o resfriador comercial, o acréscimo de umidade relativa foi 7%, passando de 53% para 60%.

A resposta da figura 11 mostra que a variação de temperatura do protótipo foi de aproximadamente 4,5° C, enquanto que a variação do resfriador evaporativo comercial foi de cerca de 1,7° C.

Na figura 12 é possível verificar que o acréscimo da umidade do protótipo é de aproximadamente 28%, passando de 50% para 78%. Para o resfriador comercial, o acréscimo de umidade relativa foi 13%, passando de 50% para 63%.

Os resultados preliminares mostram que o modelo proposto, que utiliza bomba e atomizador, apresenta uma redução de temperatura significativamente maior que o sistema comercial. O mesmo ocorre com o acréscimo de umidade relativa. O modelo proposto tem se mostrado com maior rendimento que o modelo comercial.

3.2. Modelos Matemáticos Identificados

As equação 1 representa a equação geral, no domínio da frequência, para processos, enquanto a equação 2, representa a equação geral simplificada por Padé. As equações 2 e 3, representam os modelos matemáticos identificados para os modelos de resfriadores evaporativos montado em laboratório (protótipo) e do comercial, respectivamente.

Para a montagem das equações foi necessário o cálculo dos parâmetros tempo morto (θ), constante de tempo (τ) e do ganho (k), tanto para o protótipo quanto para o resfriador comercial. A tabela 1, abaixo, apresenta os valores dos parâmetro para ambos os equipamentos.

Tabela 1. Dados de Identificação

	Resfriador Evaporativo (Protótipo)	Resfriador Evaporativo (Comercial)
Constante de tempo	145 segundos	558 segundos
Tempo Morto	12 segundos	87 segundos
Ganho	- 0,493 °C / Volt	- 0,093 °C / Volt
Entrada	5 Volts	12 Volts
Saída	- 2,2 °C	- 1,12 °C

$$G_p(S) = \frac{k \cdot e^{-\theta \cdot S}}{\tau \cdot S + 1} \quad (1)$$

$$G_p(S) = \frac{-k \cdot \theta \cdot S + 2 \cdot k}{\tau \cdot \theta \cdot S^2 + (2 \cdot \tau + \theta) \cdot S + 2}$$

$$G_p(S)_{\text{protótipo}} = \frac{5,95 \cdot S - 1}{1740 \cdot S^2 + 302 \cdot S + 2} \quad (3)$$

$$G_p(S)_{\text{comercial}} = \frac{8,12 \cdot S - 0,196}{48546 \cdot S^2 + 1203 \cdot S + 2} \quad (4)$$

O gráfico 13, abaixo, apresenta a curva resultante do experimento com o protótipo e a curva obtida da simulação do modelo matemático identificado a partir desse mesmo equipamento. A simulação foi realizada no software MATLAB e para sua realização foi dada uma entrada de 5 Volts. É possível observar que as curvas apresentam a mesma dinâmica.

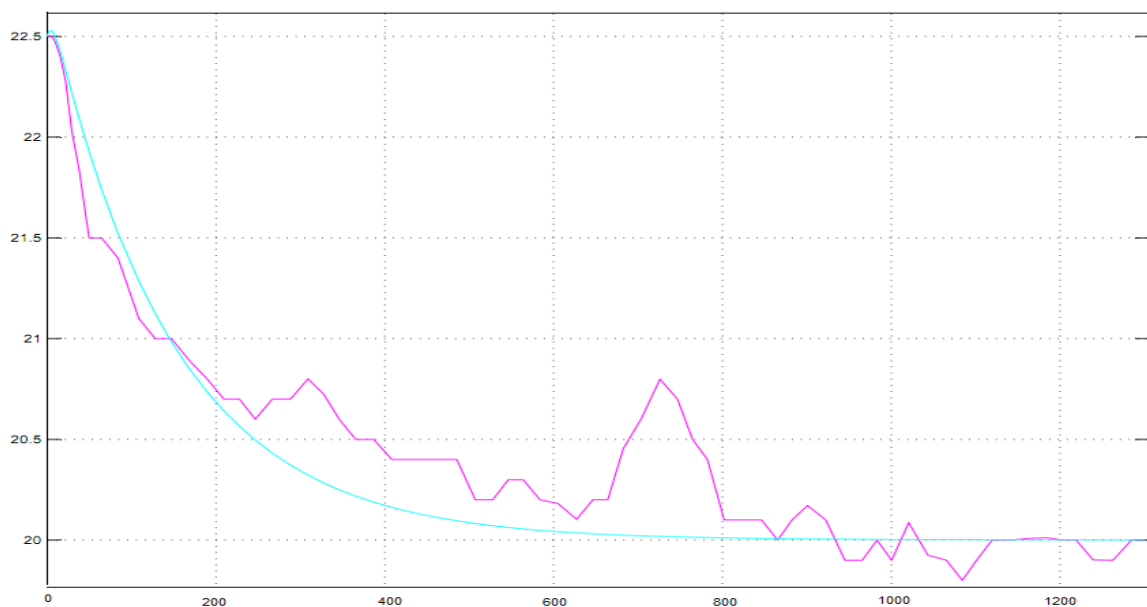


Figura 13. Gráfico de Validação dos Modelos Experimental e Identificado para o Protótipo

O gráfico 14, abaixo, apresenta a curva resultante do experimento com o modelo de resfriador evaporativo comercial. Também a curva obtida da simulação do modelo matemático identificado a partir desse mesmo equipamento. A simulação foi realizada no software MATLAB e para sua realização foi dada uma entrada de 12 Volts. É possível observar que as curvas apresentam a mesma dinâmica.

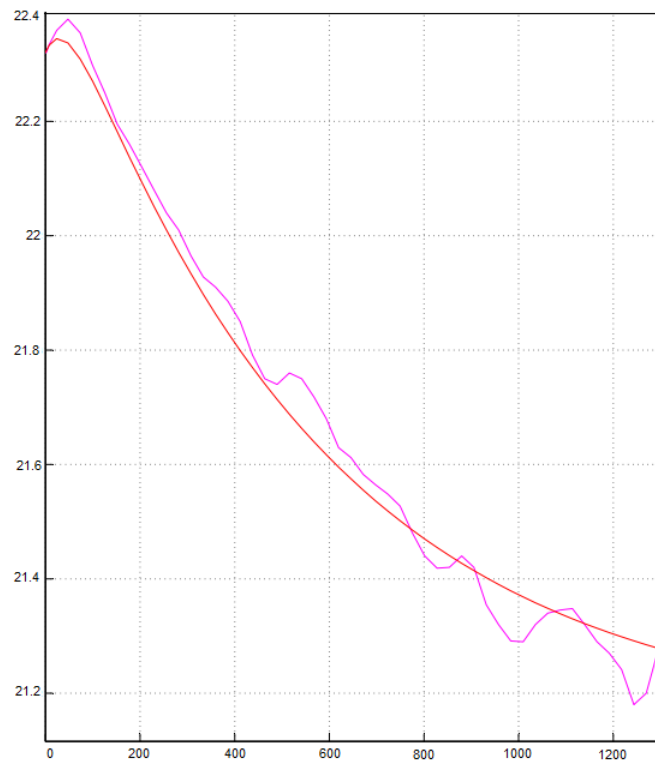


Figura 14. Gráfico de Validação dos Modelos Experimental e Identificado para o Resfriador Comercial

4. CONCLUSÃO

A análise dos resultados mostra que as variações de temperatura de bulbo seco e de umidade relativa são mais efetivas no modelo de resfriador proposto. A quebra da molécula, formando uma cortina de água pulverizada, do tipo névoa, potencializa a transferência de massa de vapor de água para a corrente de ar. O aumento da transferência de massa representa ganho em relação às temperaturas de bulbo seco mínimas alcançadas, bem como na velocidade das variações de temperatura e umidade, o que é particularmente importante para regiões quentes e secas. Nessas regiões, a elevada temperatura de bulbo seco causa desconforto e fadiga, enquanto a baixa umidade representa ressecamento. Dessa forma, o aumento da taxa de variação da temperatura e da umidade relativa representa uma necessidade. Dessa forma, a utilização do modelo proposto deve ser utilizado por aumentar a eficiência da transferência de calor e massa e, consequentemente, aumentar a sensação de conforto em regiões de clima quente e seco. Para aumentar a eficiência do sistema proposto, deve-se estudar um sistema de controle para garantir as condições desejadas, mesmo diante de perturbações nas condições climáticas externas. Também para garantir um funcionamento suave da bomba, aumentando o tempo de vida útil do equipamento. O sistema proposto possibilita o funcionamento adequado dos controladores automáticos, uma vez que o atomizador é um elemento ativo, que pode ser controlado, contrariamente aos painéis que são elementos passivos, o que dificultaria o projeto de um sistema de controle eficiente.

A modelagem matemática realizada para os sistemas, validade através das curvas, possibilitará o projeto de controladores clássicos dos tipos proporcional, proporcional integral e o proporcional integral derivativo. Também possibilitará o projeto e execução de controladores modernos do tipo Ótimo, tal como o Linear Quadrático Gausseano (LQG). A partir da experimentação desses controladores será possível obter uma estratégia de controle de forma a minimizar o consumo de energia e de água.

5. REFERÊNCIAS

- Alkhamis, T. M., El-Khazali, R., Kablan, M. M., Alhusein, M. A., 2000, "Heating of a Biogas Reactor Using Energy System with Temperature Control Unit" *Solar Energy*, Vol. 69, No. 3, pp. 239 – 247.
- ALODAN, M. A.; AL-FARAJ, A. A. Design and Evaluation of Galvanized Metal Sheets as Evaporative Cooling Pads. *Agricultural Science*, Riyadh, Saudi Arabia, v. 18, n. 1, p. 9-18, Aug./Feb. 2005.
- Braga, A. H. G., 2000, "Controle Aplicado a Sistemas Térmicos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- Braga, A. H. G., 2004, "Sistema de Controle de Temperatura para Climatização de Ambientes", Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- Bejan Adrian, 1996, "Transferência de Calor"; 4º edição, Editora Edgard Blucher, S.Paulo, Brasil, 428 p.

- Beshkani, A., Hosseini, R., 2006, Numerical modeling of rigid media evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering*, Vol.26, pp. 636-643.
- Camargo, J.R., Ebinuma C.D., 2005, "An Evaporative and Desiccant Cooling System for Air Conditioning in Humid Climates", *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* Vol. 27, pp. 243-247.
- Camargo, J.R., Ebinuma C.D., Silveira J.L., 2003, "Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, pp. 1124-1132.
- Dai, Y. J., Sumathy, K., 2002, Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 1417-1430.
- FREITAS, E. F. Construção de uma bancada otimizada para estudo de painéis evaporativos e ensaios de painéis de fibras vegetais. 2007. Trabalho
- Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2007.
- Halasz, B., 1998, A general mathematical model of evaporative cooling devices, *Rev. Gén. Therm.* Vol. 37, pp. 245- 255.
- Ismail, I. M., Mahmoud, K. G., 1994, Comparative study of different air-conditioning systems incorporating air washers, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 17, pp. 364-370.
- Kalogirou, S. A., Panteliou, S., Dentsoras, A., 1999, "Modeling of Solar Domestic Water Heating Systems Using Artificial Neural Networks", *Solar Energy*, Vol. 65, No. 6, pp. 335 – 342.
- Maclaine-Cross, I. L., Banks, P. J., 1981, A general theory of wet surface heat exchangers and its application to regenerative evaporative cooling, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 579-585.
- Masiero, E., 2006, Resfriamento evaporativo e condicionamento de ar convencional: estudo experimental comparativo. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos.
- Medeiros, J. M., Lopes, B. S. O., Freire, J. M. S., Silva, J. L. S., Viana, F. C. A., Silva, M. G., Braga, A. H. G. 2015, "Análise de um Protótipo de Condicionador de ar Adsorativo Evaporativo para Clima Quente e Úmido", *Revista Princípios*, Vol. 26, pp 27 – 41.
- Ogata, K., 2003, "Engenharia de Controle Moderno", 4º edição, editora Prentice Hall, S.Paulo, Brasil, 800 p.
- RAWANGKUL, R. et al. Performance analysis of a new sustainable evaporative cooling pad made from coconut coir. *International Journal of Sustainable Engineering*, v. 1, n. 2, p. 117-131, Aug. 2008.
- Sfetsos, A., Coonick, A. H., 2000, "Univariate and Multivariate Forecasting of Hourly Solar Radiation with Artificial Intelligence Techniques", *Solar Energy*, Vol. 68, No. 2, pp. 169 – 178.
- Soares M.; Souza, S. N. M. de; Halmeman, M. C. R.; Fracaro, G. de P. M., 2006 "Desenvolvimento de um sistema alternativo de trocador de calor para climatização de construções agroindustriais", *Eng. Agric.* Vol. 31 no. 3.
- Wang, R.Z., Li, Y., 2007, Perspectives for natural working fluids in China. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, pp. 568-581.

DEVELOPMENT STUDY AND DESCRIPTION OF THE COOLER EVAPORATIVE ATOMISER OF GIFT-ED, COMPARED MODELS CONVENTIONAL.

Abstract. Population growth requires high rates of production and energy consumption and increasing deterioration of the environment. These conditions direct research for the development of more efficient machinery and equipment. Further research is performed in order to create alternative systems to existing, with lower power consumption and can make a positive impact to the environment. The air conditioning systems represent systems characterized by their high consumption, as well as influence the degradation of the ozone layer and greenhouse effect. Refrigerants type CFC directly influence the ozone layer, while the alternative fluids HFC, especially the R 407 C and R 410 A, influence the greenhouse effect and hence global warming. An alternative system to conditioners vapor compression cycle, when used in hot, dry regions, may be the evaporative cooler. This system performs exchange of sensible and latent heat, can produce good results in the aforementioned regions, such as in northeastern Brazil. In addition to providing a milder climate, the evaporative cooler features low power consumption and can provide low cost. This paper presents the development of a new evaporative cooler model, differing business model by not having fins. The model is also equipped with an atomiser, comprising a toothed disc attached to a motor, whose function is to break the molecule of the water and spray it, allowing a greater and more rapid absorption of water by the air stream. The system developed is tested and compared with other more conventional types of evaporative cooler. For this we created a prototype, laboratory scale, have been prepared and instrumented to monitor the temperature and humidity of the air at the inlet and outlet of the prototype, as well as a temperature sensor for water. The experiments will be performed to different climatic conditions, allowing the mathematical modeling in various conditions.

Key words: evaporative cooler; model with the atomizer; reducing energy consumption.