

ANÁLISE DO USO DE CONVERSOR DE FREQUÊNCIA NA VENTILAÇÃO FORÇADA DE PAINÉIS EVAPORATIVOS VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O CONFORTO TÉRMICO

André Luiz Amorim da Fonseca⁽¹⁾; José Antonio Lambert⁽²⁾; Arnulfo Barroso de Vasconcellos⁽³⁾; Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira⁽⁴⁾; Luciana Oliveira da Silva⁽⁵⁾.

(1) UFMT, e-mail: aluizfonseca@globocom.com ;

(2) UFMT, e-mail: lambert@ufmt.com; (3) UFMT, e-mail: arnulfo@ufmt.com ; (4) UFMT, e-mail: mcjan@ufmt.com ; (5) UFMT, e-mail: xtialu@gmail.com .

Resumo

O uso da climatização evaporativa vem sendo altamente difundido e avaliado em todo o mundo, assim como a influência decorrente da variação de velocidade do ar admitido por este tipo de sistema. Neste trabalho é efetuada a análise da variação da velocidade do vento nas variáveis climáticas internas e energéticas da edificação em estudo sob diversas frequências de acionamento comparadas entre si e ao uso de dispositivos de controle no variador eletrônico de velocidade (conversor de frequência) através de cálculos a partir de dados experimentais. A referida estratégia de climatização é avaliada no período do ano recomendado para sua utilização reduzindo o consumo e a demanda por energia elétrica na estação seca, efetuando racionamento no período crítico regional, cuja matriz de geração de eletricidade é essencialmente hidráulica. As avaliações são feitas em um galpão localizado no município de Cuiabá, estado de Mato Grosso. Os resultados das medições das variáveis climáticas e energéticas indicam que não se faz necessário o uso da maior frequência de acionamento para obtenção de conforto térmico em todo o período de utilização. Desta forma obtêm-se a racionalização na demanda em até 91% em relação ao uso do condicionador de ar no mesmo período, simulado através do programa computacional Energy Plus, e a redução no consumo anual de energia elétrica substituindo apenas o condicionador de ar, no período adequado, atingiu 33%, além de demonstrar que é possível efetuar o máximo rendimento energético deste sistema com o uso do conversor de frequência com ou sem controles automáticos em contraposição ao acionamento direto alcançando redução de até 62% de demanda no próprio sistema. Ao final do trabalho são evidenciadas as variáveis que, de acordo com os resultados, devem ser observadas atentamente no projeto e instalação de sistemas semelhantes.

Palavras-chave: Variador eletrônico de velocidade, resfriamento evaporativo, conforto térmico e eficiência energética.

Abstract

The use of evaporative cooling has been highly evaluated and widespread throughout the world, as well the influence due to the variation of the inlet air speed for such a system. This work is carried out to analyze the variation of wind speed in internal climate variables and energy of the building under study in several frequency drive compared to each other and to the use of control devices in electronic variable speed (frequency converter) by calculation from experimental data. This strategy of cooling is evaluated on the year period recommended for use by reducing consumption and demand for electricity in the dry season, making rationing during critical regional period, whose matrix electricity generation is essentially hydraulic. Assessments are made in a shed in the city of Cuiabá, Mato Grosso state. The results of measurements and energy climate variables indicate that it is not necessary to use the higher frequency drive to achieve thermal comfort throughout the period

of use. Thus were obtained the rationalization in demand up to 91% compared to the use of the air conditioner in the same period, simulated by the computer program Energy Plus, and the reduction in annual consumption of electrical energy by simply replacing the air conditioner in the period appropriate was up 33%, and demonstrate that you can make to maximize energy efficiency of this system using the frequency converter with or without automatic controls as opposed to direct drive reaching up to 62% reduction of demand on the system itself. At the end of the work are highlighted variables that should be observed carefully in the design and installation of similar systems.

Keywords: *Variable electronic speed, evaporative cooling, thermal comfort and energy efficiency.*

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional gerou maior rigor nas condições térmicas ambientais de trabalho ou de permanência do ser humano resultando em um acréscimo na demanda por energia elétrica destinada à climatização de ambientes em todos setores de consumo. Portanto, com o objetivo de amenizar essa expansão de demanda e suprir as condições ambientais exigidas para o conforto térmico humano várias alternativas de climatização, em contraposição a utilização do condicionador de ar, têm sido estudadas. Neste contexto figuram os sistemas de resfriamento evaporativo, os quais, de acordo com Camargo (2004), operam utilizando fenômenos naturais através de processos induzidos nos quais a água e o ar são os fluidos de trabalho. Consiste na utilização da evaporação de água provocando uma redução na temperatura do ar. De acordo com Camargo (2009) o arranjo direto destes sistemas em conjunto com a refrigeração mecânica reduzem os custos de operação entre 25 a 40% quando comparados com a refrigeração mecânica isoladamente, para produzir o mesmo efeito de resfriamento.

A climatização evaporativa é classificada em diversas categorias de acordo com os fenômenos psicrométricos envolvidos e os arranjos físicos utilizados, assim como ilustrado por Lamberts et al. (1997) existem a arborização, o resfriamento evaporativo de superfícies edificadas, nebulização, resfriamento evaporativo indireto e outros métodos. De acordo com Sumathy e Day (2002) alguns dos sistemas de resfriamento evaporativo direto utilizam um filtro de celulose de constituição similar à colméia de abelhas, uma bomba e reservatório de água, um ventilador e um aspersor, e estes são chamados de sistemas de resfriamento evaporativo do tipo colméia de abelha (do inglês *honeycomb*). O painel utilizado é umedecido, aumentando a área de contato entre a água e o ar facilitando a evaporação da água, e, conseqüentemente, ocasionando maior redução de temperatura do ar.

Carossi (2006) estuda a aplicabilidade de sistemas de resfriamento evaporativo no território brasileiro ao longo do ano. Em sua dissertação utiliza dados climáticos regionais, dividindo cada estado do Brasil em regiões, e indicando os meses para melhor aplicação deste sistema em cada uma dessas. Para o estado de Mato Grosso, especificamente na região de Cuiabá, os meses indicados para o uso desta estratégia de climatização vão de Abril a Agosto, justamente o período seco local, possibilitando a redução de demanda por energia elétrica neste período crítico de baixa no potencial de geração de energia hidrelétrica.

Nogueira et al.(2010) efetuam análise das estratégias de climatização adequadas à Cuiabá através do uso de carta bioclimática e dados locais do TRY (*Test Reference Year*, ou Ano Climático de Referência). Os resultados obtidos evidenciam que no período entre 23/06 a 22/09 a estratégia de climatização por resfriamento é necessária em 31,7% das horas enquanto a necessidade pelo condicionador de ar é exigida em apenas 0,317% viabilizando sua

utilização no período em conjunto de outras estratégias como sombreamento, massa para resfriamento e ventilação.

Com enfoque na avaliação do uso da variação de velocidade do ar nesse sistema foram feitas aplicações do conversor de frequência nas simulações efetuadas por Wang e Xu (2007) e em diferentes condições o conversor de frequência resultou no melhor método para racionalizar energia nestes sistemas, permitindo uma variação contínua da vazão de ar resfriado admitido.

Foi apresentado por Liao e Hung (2002) um sistema de resfriamento evaporativo em laboratório para análise de desempenho do mesmo. No controle de velocidade do ar foi utilizado um conversor de frequência, a partir dos resultados apresentados percebe-se claramente que a redução da velocidade do vento e o aumento da espessura do painel são diretamente proporcionais a efetividade do sistema. A mesma tendência foi observada nas simulações de Castro e Pimenta (2002).

A equação de cálculo de efetividade dos sistemas de resfriamento evaporativo leva em consideração a proporção entre a queda real de temperatura de bulbo seco e a máxima queda teórica possível desta se o resfriador fosse 100% eficiente e o ar saísse do mesmo saturado (Camargo, 2004).

$$\varepsilon = \frac{T_{bse} - T_{bssa}}{T_{bse} - T_{bue}} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

ε = efetividade do resfriamento evaporativo (0 a 1);

T_{bse} = temperatura de bulbo seco do ar de entrada do resfriador evaporativo (°C);

T_{bssa} = temperatura de bulbo seco do ar de saída do resfriador evaporativo (°C);

T_{bue} = temperatura de bulbo úmido do ar de entrada do resfriador evaporativo (°C).

Em relação a eficiência energética em ventiladores centrífugos e axiais os estudos de Moreira (2006) e Moreira et al. (2009) sugerem o cálculo da potência ativa economizada percentual, com o uso do conversor de frequência, quantificando a eficiência energética do ventilador.

$$Pa_e = \left(\frac{Pa_{(PD)} - Pa_f}{Pa_{(PD)}} \right) \times 100 \quad [\text{Eq. 02}]$$

Sendo:

Pa_e = potência ativa economizada (%);

$Pa_{(PD)}$ = potência ativa solicitada pelo sistema na partida direta (W);

Pa_f = potência ativa solicitada pelo sistema em determinada frequência menor que a frequência nominal (60Hz) acionada por conversor de frequência (W).

Embora este trabalho represente um estudo de caso, fornece indicativos de possível economia de energia elétrica ativa e redução de demanda em todo o país se o resfriamento evaporativo for utilizado em substituição ao ar condicionado nos meses adequados. A partir da metodologia apresentada, embasada em revisão bibliográfica, e com uso de medidores e registradores adequados de temperatura (°C), umidade relativa (%) e potência elétrica ativa (W) poderá ser feita uma análise com maior ou menor precisão para estudos ou aplicações posteriores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados nesta seção o local de estudo, os instrumentos de medição, os programas computacionais de simulação e cálculo, assim como a metodologia aplicada na coleta dos dados e na simulação efetuada do galpão em estudo.

2.1. Local de estudo

As medições de campo foram efetuadas em um galpão que se localiza no município de Cuiabá, estado de Mato Grosso, climatizado por três painéis evaporativos com ventiladores controlados por conversor de frequência, área climatizada é de aproximadamente 398m², pé direito em torno de 4 metros, possui telhado de embalagem reciclável *Tetrapak*®, fechamentos simples de alvenaria, forro de PVC branco e aberturas protegidas por toldos de lona de PVC, apresentando assim características que sugerem alta carga térmica para climatização.

2.2. Equipamentos e suas disposições

A área climatizada do galpão foi dividida em quatro zonas de áreas iguais, com a locação de registradores horários de temperatura e umidade relativa, a uma altura 1,30 metros e, no centro de cada zona, de acordo com normas e recomendações dadas por entidades internacionais, assim como autor especializado em assuntos de análise térmica ambiental. (ABNT,2008; ISO,1995; ASHRAE,2005; FANGER,1970). A Figura 1 ilustra tanto disposição de equipamentos na parte interna do galpão em estudo como também a localização dos painéis evaporativos em seu interior, as respectivas legendas desta ilustração constam na Figura 2.

Figura 1– Galpão e pontos de instalação de equipamentos

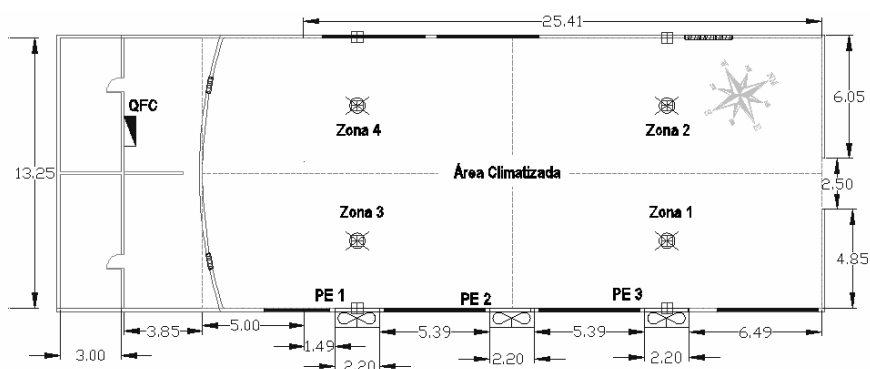
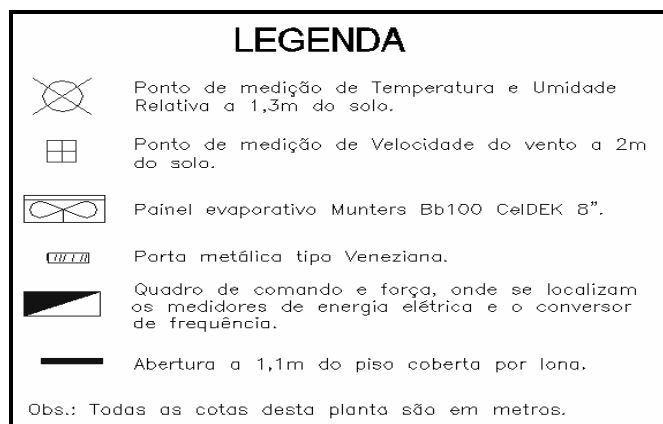


Figura 2 – Legenda dos pontos do galpão



Os dados obtidos de temperatura e umidade relativa externa foram coletados através de um registrador posicionado a 22 metros em abrigo meteorológico adequado, distância pela qual se obteve maior exposição ao sol em todas as direções, neutralizando a influência de sombreamento ocasionado por existência de vegetação próxima ao galpão. O abrigo meteorológico utilizado fornece proteção contra radiação solar direta no medidor e permite simultaneamente a ventilação em seu interior. O horário de medição, em cada dia, ocorreu entre as 8 e 18 horas. Este período foi sugerido por Camargo (2009) em metodologia própria para avaliação de desempenho em sistemas de resfriamento evaporativo. Os registros automáticos ocorreram a cada 5 minutos decorridos, ampliando o detalhamento da variação térmica horária, tanto internamente quanto externamente à área climatizada.

Com o objetivo de alcançar maior estabilidade climática entre os dias de avaliação as medições foram realizadas durante o mês de Agosto do ano de 2010, dentro do período recomendado para uso de climatizadores evaporativos por Carossi (2006) e com menor variabilidade da umidade relativa e da temperatura externa diária, contendo poucos dias de baixa temperatura externa média, que esteve de 37 e 38 °C. As medições foram efetuadas em 9 dias, sendo que no primeiro destes o sistema estava desligado e nos outros 8 restantes o mesmo foi acionado à uma frequência diferente por dia através do conversor de frequência compreendendo a faixa, entre 25 a 60 Hz, utilizada para eficiência energética por Moreira et al. (2009), variando a velocidade de rotação no eixo do ventilador axial de 5 a 5 Hz (25;30;35;40;45;50;55 e 60Hz).

Em todos os dias de medição o ambiente esteve sem a presença de pessoas no interior da edificação, o que torna evidente que o presente estudo tem enfoque maior de climatização do que no conforto térmico proveniente pelo mesmo, entretanto foram efetuados zoneamentos com os pares de temperatura e umidade relativa medidos internamente em diagrama proposto pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o conforto térmico humano, sendo este o único critério para análise de conforto térmico. O referido diagrama está disponível no endereço eletrônico “http://www.inmet.gov.br/html/clima/conforto_term/index.html”, com acesso realizado em 30/01/2012.

Os equipamentos utilizados para registrar as medidas de temperatura e umidade relativa do interior do galpão foram quatro *data loggers* modelo HT 500 para monitorar a temperatura externa e dentro de abrigo foi utilizado um Hobo U12-012. Para o estudo de velocidade do vento foi utilizado um termo-higro anemômetro THAR-185 da Instrutherm. Para registro das grandezas elétricas foram utilizados dois registradores SAGA 3000 da ESB Medidores, um para a entrada geral de energia do sistema e outro para a entrada da alimentação do conversor de frequência. Para monitorar o consumo de água de foi utilizado um hidrômetro U9101A da Lao Industria na entrada de água de um dos painéis evaporativos.

Para levantamento das coordenadas dos pontos de medição, tanto quanto a altitude local fora utilizado um GPS do fabricante *Garmin®*, modelo *eTrex Venture HC*.

2.3. Simulação no programa computacional *Energy Plus*

Para a simulação do uso de condicionador de ar e as respectivas cargas térmicas obtidas foram utilizados os dados do *TRY* para a cidade de Cuiabá-MT e propostas duas situações.

Na primeira o galpão foi simulado como na prática com os parâmetros dos materiais utilizados, na maioria, fornecidos por Morishita et al. (2010) e utilizado o vidro de espessura de 2,5 milímetros para efetuar o fechamento das aberturas existentes, nesta situação os parâmetros utilizados na simulação estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais para simulação do galpão em situação real com fechamento das aberturas em vidro

Material	Densidade mássica ρ [kg/m ³]	Condutividade térmica λ [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
Concreto	2400	1,75	1
Forro PVC	1300	0,2	0,96
Reboco	2000	1,15	1
Telha Tetrapak	1900	0,95	0,84
Tijolo Cerâmica	1600	0,9	0,92
Vidro 2,5 mm	2500	0,9	840

Fonte: (Adaptado de Morishita et al., 2010)

O galpão simulado resultou em uma carga térmica de aproximadamente 119 kW para o ambiente sem a presença de pessoas. As características da telha do tipo *Tetrapak*® foram obtidas a partir do trabalho de Coutinho et al. (2003).

Em uma segunda etapa foram propostas melhorias na envoltória do galpão. As alterações efetuadas foram o uso de gesso para o forro em contraposição ao PVC e a telha de cerâmica em substituição à telha de *Tetrapak*®. A Tabela 2 traz apenas os parâmetros dos materiais inseridos na simulação computacional.

Tabela 2 – Materiais alterados na simulação com melhoria do envoltório da edificação

Material	Densidade mássica ρ [kg/m ³]	Condutividade térmica λ [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
Forro Gesso 3cm	750	0,35	0,84
Telha Cerâmica	2000	1,05	0,92

Fonte: (Adaptado de Morishita et al., 2010)

A carga térmica para o galpão modificado foi reduzida para aproximados 3,5 kW, evidenciando que as melhorias na envoltória da edificação puderam reduzir a potência nominal de condicionamento de ar para o galpão.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta parte do trabalho alguns resultados obtidos com as medições serão apresentados resumidamente e posteriormente a análise destes será dividida em seções específicas de acordo com cada gênero estudado.

3.1. Apresentação simplificada dos resultados obtidos

Os resultados de variáveis climáticas internas e externas do ambiente estão resumidos no Quadro 1, onde parte dos extremos das variáveis climatológicas foram dispostos. As maiores reduções de temperatura e aumentos de umidade obtidos comparando cada média interna e externa simultaneamente também são apresentados.

Quadro 1 – Resumo de variáveis climáticas internas e externas ao galpão em estudo

Frequência de acionamento	(Hz)	25	30	35	40	45	50	55	60
Temperatura Externa Máxima	(°C)	40,29	40,86	40,46	40,34	39,83	41,94	40,37	41,65
Temperatura Externa Mínima	(°C)	29,87	28,72	29,27	30,34	30,34	27,73	30,85	30,47
Temperatura Interna Máxima	(°C)	33,55	33,08	32,06	32,62	31,80	30,50	30,78	31,68
Temperatura Interna Mínima	(°C)	28,18	26,43	26,42	27,88	27,70	25,60	26,65	27,20
Máxima Redução de Temperatura	(%)	8,65	9,45	9,88	8,86	9,24	12,18	10,70	11,56
Umidade Externa Máxima	(%)	43,13	35,95	42,47	48,29	47,90	54,08	45,35	44,84
Umidade Externa Mínima	(%)	14,10	16,45	23,38	26,07	28,78	21,08	27,54	21,80
Máximo Aumento de Umidade	(%)	27,74	33,06	36,36	34,70	32,55	38,54	37,50	38,09

Uma análise preliminar do Quadro 1 possibilita destacar que a máxima redução de temperatura e o máximo aumento de umidade relativa foram ambos obtidos para a frequência de acionamento de 50Hz, sendo que neste dia ocorreu a maior variação climatológica externa e proporcionando a menor temperatura interna, indicando de que a redução de temperatura depende destas condições.

Outros resultados estão dispostas no Quadro 2 que contém variáveis que retratam tanto a energia elétrica quanto o consumo de água e a velocidade do ar de saída do sistema. Os dados foram obtidos para cada dia de medição com a sua específica frequência de acionamento ajustada.

Quadro 2 – Resumo de variáveis de potência ativa, velocidade do vento e consumo de água.

Freq.	Potência Ativa Média do SRE	Redução de potência ativa do SRE em Relação a Partida Direta	Redução de potência ativa dos Ventiladores em Relação a Partida Direta	Velocidade do Ar na Saída do SRE	Consumo Diário de água
(Hz)	(W)	(%)	(%)	(m/s)	(l)
25	943,91	62,09	75,94	2,77	330,00
30	1049,51	57,85	70,88	3,33	350,00
35	1172,99	52,90	64,81	3,96	355,00
40	1342,68	46,08	56,63	4,51	355,00
45	1611,26	35,29	43,82	5,34	350,00
50	1834,56	26,33	33,04	5,77	460,00
55	2123,10	14,74	19,04	6,20	490,00
60	2486,13	0,00	0,00	6,59	530,00

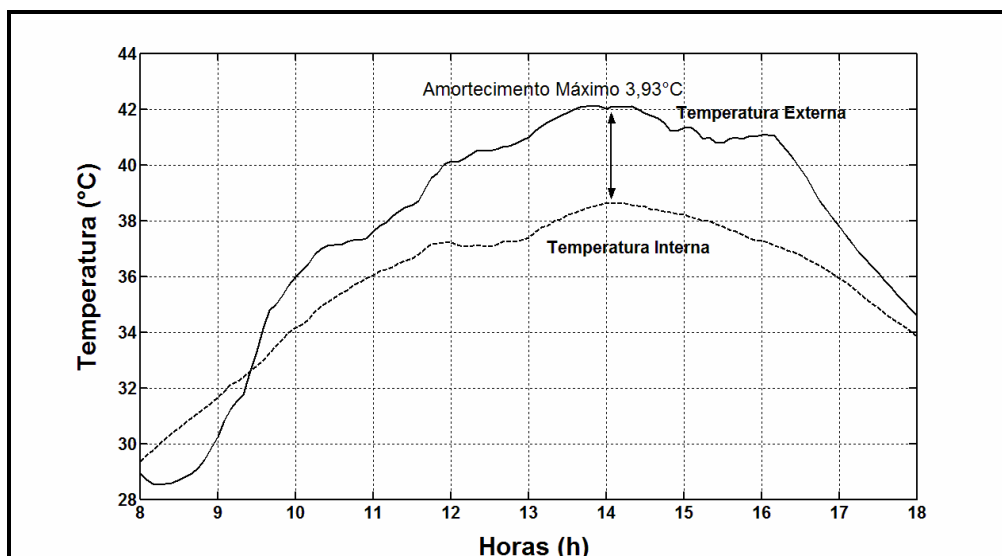
Através da observação do Quadro 2 torna-se possível perceber que o aumento da frequência de acionamento proporciona uma elevação tanto na velocidade do ar na saída dos painéis e na potência ativa média solicitada pelo sistema quanto no aumento do consumo diário de água de um dos painéis. Portanto fica evidente que o uso do conversor de frequência ocasiona

economia de água e de energia no sistema e como as condições climáticas externas variam ao longo do dia uma menor vazão de ar resfriado evaporativamente seria necessária durante os períodos de temperaturas mais amenas e maiores vazões para temperaturas mais quentes.

3.2. Análise de amortecimento e atraso térmico

Para uma análise prévia de amortecimento e atraso térmico da edificação foi efetuado um gráfico com a medição simultânea interna e externa ao ambiente com o sistema de resfriamento evaporativo desligado. O gráfico obtido está ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração de análise de amortecimento e atraso térmico

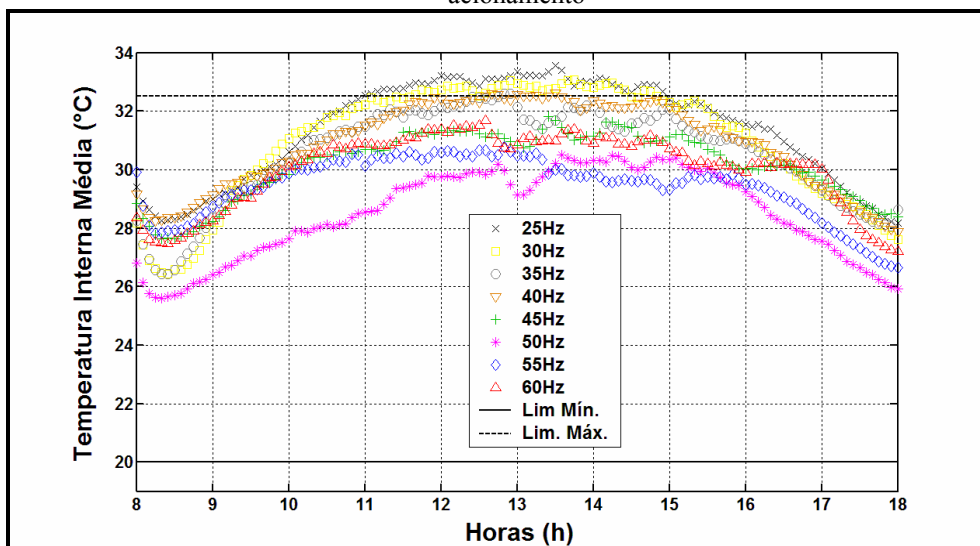


A partir da observação do gráfico percebe-se que o amortecimento térmico na edificação foi de no máximo 3,93°C e também que praticamente não ocorreu atraso térmico. Outra situação notada foi que no período entre as 08 e 9:30 horas a temperatura interna é maior que a externa, e isto pode ser atribuído ao calor armazenado nas paredes da edificação no dia anterior e que estava ainda sendo transferido ao interior do galpão.

3.3. Análise da temperatura interna média e da umidade relativa interna média

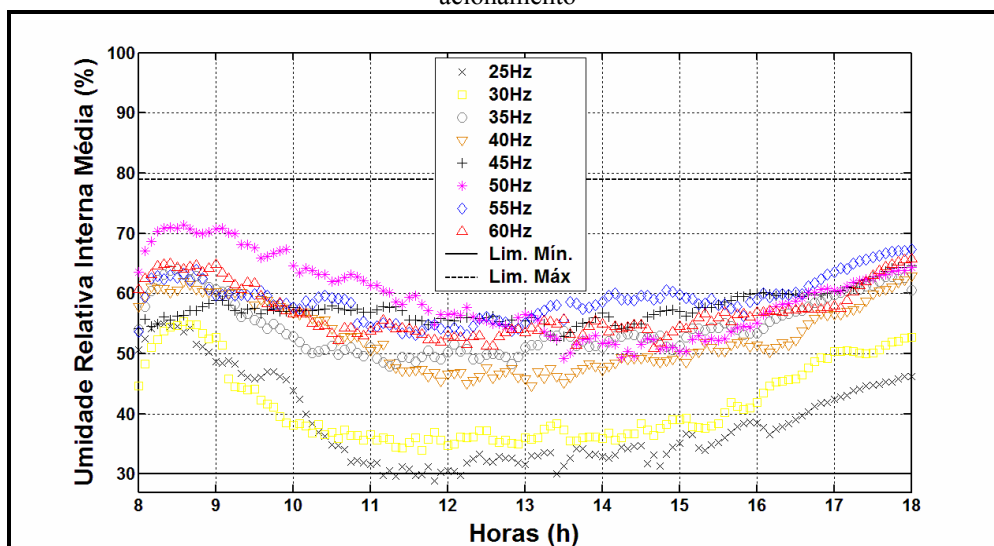
Foi construído na Figura 4 um gráfico com o comportamento da temperatura interna média, durante cada dia de medição e feita uma delimitação do conforto térmico pleno incluindo a zona de necessidade de ventilação para o atingi-lo, isto porque o sistema de climatização evaporativa também proporciona ventilação. De acordo com o diagrama de conforto térmico humano sugerido pela INMET incluindo as duas zonas citadas o limite superior de temperatura é de aproximadamente 32,5°C e inferior de 20°C.

Figura 4 – Comportamento da temperatura interna média no galpão em estudo para cada frequência de acionamento



Percebe-se que apenas as frequências acionadas maiores que 40Hz mantiveram a temperatura dentro do limite superior e considerando que o sistema o vento para suprir sua necessidade pode-se considerar que a partir de 45Hz a temperatura se manteve em níveis adequados para o conforto térmico humano ao longo do período de medição, para atividades físicas leves. Já na Figura 8 foi feita uma ilustração análoga à anterior, porém para a umidade relativa interna média.

Figura 5 – Comportamento da umidade relativa interna média no galpão em estudo para cada frequência de acionamento



A partir da observação da Figura 8 é possível perceber que apenas na frequência de 25Hz a umidade relativa não foi mantida na faixa de conforto conforme diagrama do INMET, que vai de 30 a 79%, as maiores umidades ocorreram para 50 e 55Hz evidenciando que a máxima frequência de acionamento não proporcionou a maior umidade relativa interna.

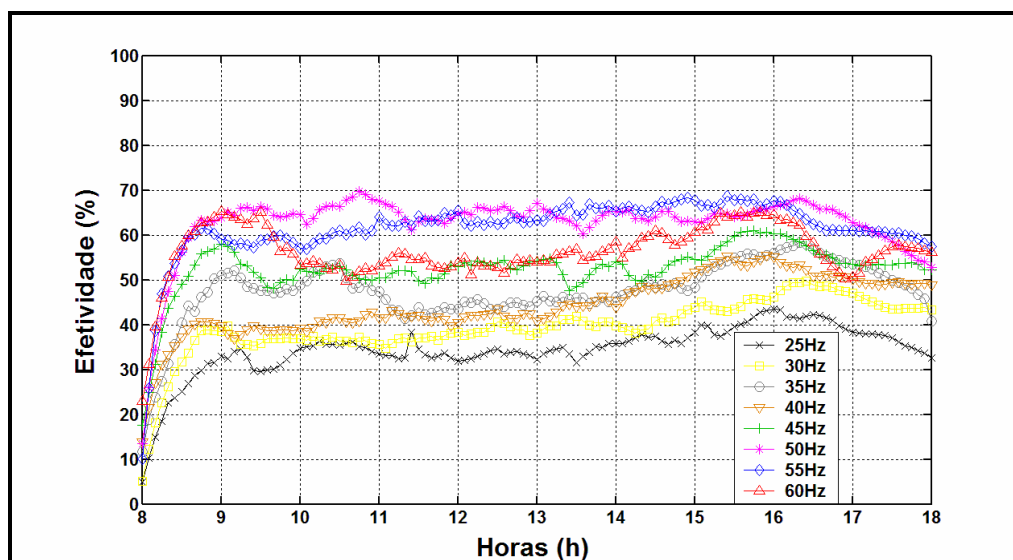
3.4. Análise da efetividade do sistema de resfriamento evaporativo

Para o cálculo da efetividade foi utilizada a Equação 1, apresentada anteriormente, sendo que a mesma não foi obtida junto ao painel evaporativo, mas com as temperaturas e umidades

relativas internas e externas ao ambiente climatizado, assim o enfoque do cálculo ficou mais ligado ao desempenho na climatização do ambiente do que o do próprio sistema. A obtenção ocorreu através de cálculos efetuados pelo programa computacional Psicrom (Roriz,2001) que utiliza além das variáveis de temperatura do ar e da umidade relativa a altitude do local onde os dados foram coletados.

O comportamento diário das efetividades para cada frequência de acionamento da ventilação forçada foram registrados e ilustrados através da Figura 6.

Figura 6 – Comportamento das efetividades para cada frequência de acionamento durante o acionamento



A partir da observação da Figura 9 é possível perceber que ocorreram, ao longo do dia, para as frequências de acionamento de 50 e 55Hz, as máximas efetividades, solicitando uma menor demanda por energia elétrica que o acionamento direto (60Hz). Nos períodos de temperatura externa mais baixa não seria necessária uma alta eficiência, além de que a frequência de 50Hz atenderia a climatização do ambiente economizando cerca de 26,33% em relação ao acionamento a velocidade nominal.

3.5. Análise da simulação em *Energy Plus*

A partir de melhorias na envoltória da edificação foi possível perceber uma redução de aproximados 3% de potência de refrigeração para condicionamento do ar em manutenção de uma temperatura de 25°C que mantenha seguramente o conforto sem necessidade de ventilação, como sugere o diagrama do INMET, até mesmo porque o condicionador de ar não fornece ventilação adicional para melhorar as condições térmicas. A primeira e a segunda simulação do galpão com as alterações propostas resultaram, respectivamente, na demanda por potência ativa máxima de 45,7 kW e de 44,5kW e consumo de energia elétrica ativa mensal máximo de aproximadamente 5MWh e de 4,8MWh.

A partir das diferenças de carga térmica e dos resultados obtidos para ambas simulações torna-se possível concluir que as modificações na envoltória resultaram em uma racionalização de energia elétrica o que poderia ser ainda melhorado com instalação de brises nas aberturas do galpão, entre outras medidas. Os resultados obtidos para cada mês através de simulação foram comparados aos provenientes do uso do sistema de resfriamento evaporativo, pois sendo o segundo constituído de cargas motrizes fixas não apresentou variações consideráveis de demanda por potência ativa em medições simplificadas efetuadas em diferentes estações do ano de 2010. A simulação foi efetuada para fornecer subsídios para

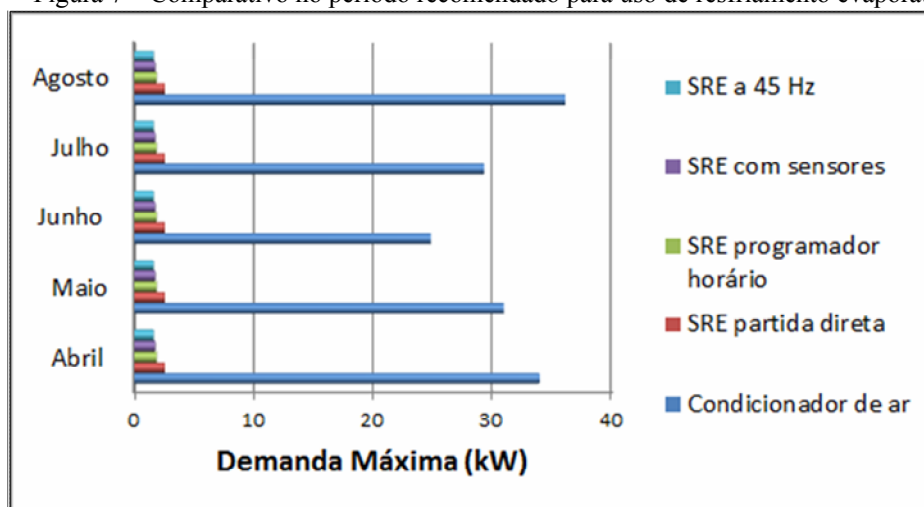
comparativo com o resfriamento evaporativo devido a isto os resultados de simulação não foram detalhados.

3.6. Análises comparativas de energia elétrica

Antes de qualquer análise é preciso ressaltar novamente que a demanda por potência elétrica ativa e o consumo estão considerando o ambiente sem pessoas, condições pelas quais as variáveis climáticas internas foram medidas para a climatização evaporativa. Além de tudo o condicionador de ar não aumenta a umidade relativa do ambiente e por isso não ocasionará conforto nos períodos em que a umidade relativa externa for menor que 30%.

A Figura 7 traz um comparativo de demanda por energia elétrica ativa entre o uso do ar condicionado e das estratégias empregadas no uso do resfriamento evaporativo acionado por conversor de frequência ou através de acionamento direto, as alternativas de acionamento do Sistema de Resfriamento Evaporativo (SRE) são: frequência ajustada em 45Hz; frequência controlada por sensores de temperatura e umidade; frequência controlado por programador horário e acionamento direto (nominal). Cada demanda máxima encontrada em medição foi comparada com a demanda máxima proveniente da simulação da utilização do condicionador de ar.

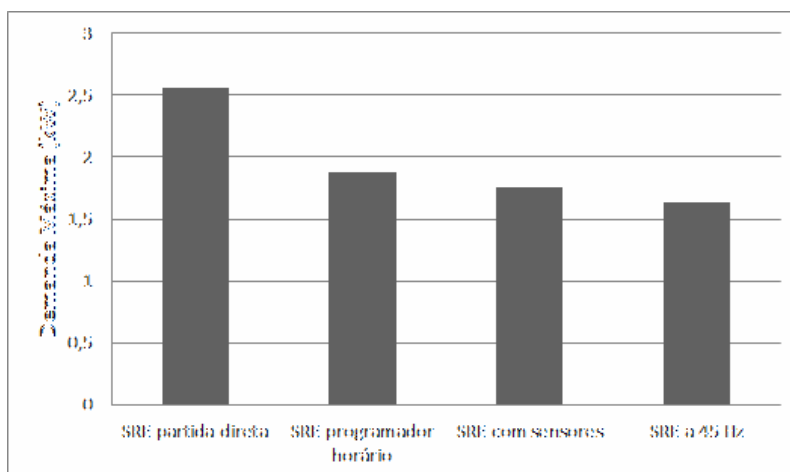
Figura 7 – Comparativo no período recomendado para uso de resfriamento evaporativo



Observa-se que a menor diferença entre as demandas máximas do uso de condicionador de ar e a climatização evaporativa esteve em torno de 91,2% no mês de Junho, ressaltando uma das vantagens na substituição do ar condicionado pelos sistemas de resfriamento evaporativo na época adequada.

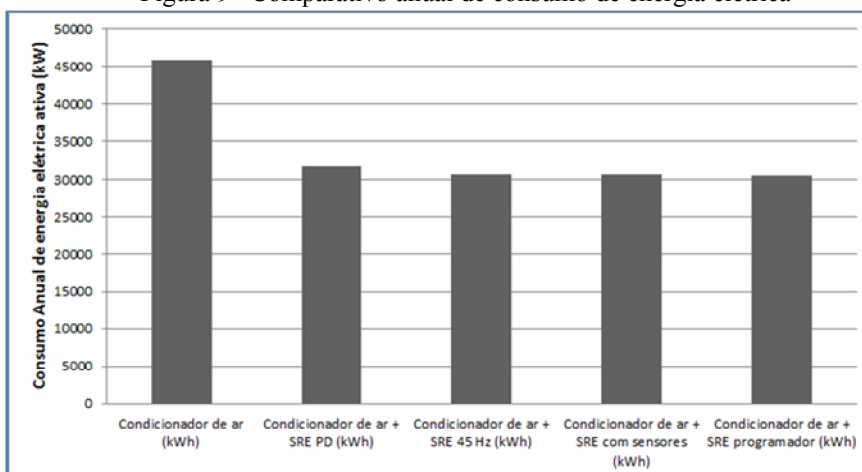
Comparando entre si as demandas máximas por energia elétrica ativa nas alternativas de acionamento do sistema de resfriamento evaporativo que mantiveram as condições climáticas internas na faixa de conforto pleno e necessidade de ventilação para conforto obteve-se o gráfico disposto na Figura 8.

Figura 8– Comparativo de demanda máxima entre as alternativas de acionamento do SRE



A Figura 9 ilustra o consumo anual de energia elétrica para o uso isolado do condicionador de ar e as estratégias de uso misto em conjunto com o resfriamento evaporativo, sendo a primeira técnica substituída pela segunda durante os meses adequados do ano.

Figura 9– Comparativo anual de consumo de energia elétrica



Com a substituição do resfriamento evaporativo no período adequado do ano foi obtida uma economia anual de energia elétrica ativa em torno de 15,3MWh que poderia atender o sistema de resfriamento evaporativo acionado diretamente durante um período aproximado de 2 anos e 3 meses, em 10 horas de uso por dia, durante 22 dias por mês.

4. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos foi possível perceber que o uso do condicionador de ar no período seco poderá manter o conforto térmico no tocante a temperatura, entretanto não manterá a faixa de umidade, pois nesta situação a umidificação do ar se tornará indispensável. Além disso, a adição de 200 pessoas ao ambiente com condicionador de ar quase dobrará seu valor de demanda máxima e isto não ocorre no resfriamento evaporativo devido a suas características de acionamento, estas proporções de aumento de demanda são importantes neste caso.

A máxima economia de energia anual alcançada com o uso da climatização evaporativa em substituição ao ar condicionado no período entre Abril e Agosto do ano foi de

aproximadamente 33%. O uso do conversor de frequência na ventilação forçada do sistema de resfriamento em relação ao sistema acionado por frequência da rede, mantendo a temperatura e a umidade na faixa adequada apresentou uma economia no consumo diário de aproximadamente 44%, com utilização da programação horária. Os resultados reforçam a idéia de que a variação das estratégias de climatização pode ocasionar uso racional da energia elétrica e suprir necessidades climatológicas, tais como a umidificação do ar.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ASHRAE Standard 55*. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-2*. Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6401*. Instalações de Ar Condicionado para Conforto – Parâmetros Básicos de Projeto. Rio de Janeiro, 2008.
- CAMARGO, J. R. *Resfriamento evaporativo* : Climatização Ecológica. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.
- CAMARGO, J. R. *Resfriamento Evaporativo*: Poupar Energia e Meio Ambiente. Revista Ciências Exatas, Taubaté, v. 9/10, n 1-2, p. 69-75, 2003/2004.
- CAROSI, G. A. B. *Resfriamento Evaporativo : Estudo do Potencial de sua Aplicação no Brasil*. 2005. 100 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2006.
- COUTINHO, F. M. B. et al. Polietileno: Principais tipo, Propriedades e Aplicações. Revista Polímero: Ciência e Tecnologia, v. 13, n 1, p. 1-13, 2003.
- FANGER, O. *Thermal Comfort*. Analysis and Application in Environmental Engineering. Copenhagen: 1970.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD. *ISO 7730*. Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions of Thermal Comfort. Geneva, 1994.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R.. *Eficiência energética na arquitetura*. São Paulo: Pw, 1997.
- LIAO, C. M.; KUN- HUNG, C. *Wind Tunnel Modeling the System Performance of Alternative Cooling pads in Taiwan Region*. Building and Environment 37. p.177–187. 2002.
- MOREIRA, A. B. *Análise da Operação de Sistemas de Ventilação Industrial Visando à Eficiência Energética*. Universidade Federal do Ceará – UFC, 141p. 2006.
- MOREIRA, A. B. et al. *Eficiência Energética em Sistemas de Ventilação Axial*. Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009.
- MORISHITA, C. et al. *Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas*. Apostila. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- NOGUEIRA, M. C. J. A. et al. *Contribuições ao estudo de conforto ambiental na grande Cuiabá-MT*. Cuiabá: Edunic, 2009.
- RORIZ, M. *Psicrom* - Versão 1.0. Programa computacional. Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Engenharia Civil. 2003.
- SUMATHY, K.; DAI, Y.J. *Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material*, Applied Thermal Engineering, v. 22, n. 13, p.1417-1430, 2002.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. *EnergyPlus* - Versão 3.0.0. Programa computacional. Disponível em [http://www.energyplus.gov]. Acesso em 10/12/2008.
- WANG, S.; Xu, X. *Effects of Alternative Control Strategies of Water-Evaporative Cooling Systems on Energy Efficiency and plume control: A case study*. Building and Environment 43. p.1973–1989. 2007.