

## Análise da Eficiência de Um Sistema de Resfriamento Evaporativo para a Cidade de Cascavel-Pr.<sup>1</sup>

Llucas Decarli Bottega<sup>2</sup>, Samuel Nelson Melegari de Souza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aceito para Publicação no 3º Trimestre de 2015

<sup>2</sup>Acadêmico de Engenharia Civil na Universidade Estadual do Oeste do Paraná- UNIOESTE, bottega\_\_lucas@hotmail.com

<sup>3</sup>Professor do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas na Universidade Estadual do Oeste do Paraná- UNIOESTE, samuel.souza@unioeste.br

### **Resumo:**

O trabalho objetivou realizar uma avaliação de um processo de resfriamento evaporativo na cidade de Cascavel-PR. A análise desse sistema foi realizada com base em dados coletados com equipamentos capazes de quantificar as variáveis envolvidas ao longo dos quatro meses de coleta de dados, que foram coletados em uma edificação com equipamento de resfriamento evaporativo instalado. As variáveis quantificadas e submetidas a análise foram: temperatura e umidade relativa do ar (ambiente interno e externo), velocidade do fluxo do ar na entrada e saída do equipamento e o consumo de energia elétrica. Assim, com os dados obtidos e a análise realizada, foi possível demonstrar a capacidade que esse tipo de climatização possui de reduzir a carga térmica do ambiente, diminuindo assim a sua temperatura, e também a possibilidade de elevar a umidade relativa do ar próximo a sua umidade de saturação. Além disso, quando o processo de resfriamento evaporativo foi comparado com a utilização do ar-condicionado, para a mesma necessidade de temperatura, notou-se uma grande redução no consumo de energia elétrica, comprovando que o processo de resfriamento evaporativo é eficiente e viável em determinadas situações.

**Palavras-chave:** Climatizador, Climatização de Ambientes, Energia.

### **Abstract**

This study aimed to make an assessment of an evaporative cooling process in the city of Cascavel, PR. The analysis of this system was based on data collected with equipments capable of quantifying the involved variables over the four months of data collection, which were collected in a building with evaporative cooling installed equipment. The quantified variables subjected to analysis were: air temperature and relative humidity (internal and external environment), air flow velocity in and out of the equipment and the consumption of electricity. Then, with the data obtained and the performed analysis, it was possible to demonstrate the ability of this type of cooling features have to reduce the thermal load in the environment, thereby lowering its temperature, and also the possibility of raising the relative humidity near its moisture saturation. Moreover, when the evaporative cooling process was compared with the use of air conditioning, for the same need for temperature, there has been a large reduction in the consumption of electricity, proving that the evaporative cooling process is efficient and feasible in certain situations.

**Keyword:** Climate Control, HVAC Systems, Energy.

### **Introdução**

O corpo humano é muito suscetível às variações de temperatura e umidade dos ambientes em que se encontra, o que traz um certo desconforto caso esses parâmetros não estejam de acordo com os parâmetros corporais do ser humano, necessitando assim da realização de climatização para que haja um maior conforto.

A climatização de ambientes é o que permite que se tenha um maior conforto térmico nestes locais que anteriormente eram considerados demasiadamente secos, úmidos, quentes ou frios, e que causavam um desconforto para a realização das atividades diárias humanas.

Para que a climatização ocorra é necessário que energia seja consumida, visto que os processos de climatização não são naturais. Esse consumo de energia aumenta consideravelmente de acordo com a condição final desejada, pois quanto mais distante da condição natural do ambiente ela esteja, maior será o consumo de energia (CAMARGO, 2004).

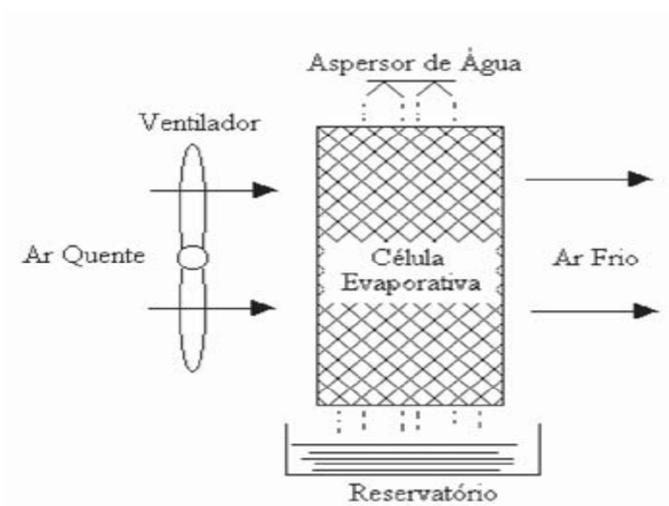
Segundo Datta et al. (1986) o resfriamento evaporativo (RE) é um processo simples, e tem como vantagem, sobre os sistemas de condicionamento de ar comuns (ar condicionado),

uma redução de até 75% no consumo de energia, além de menores custos de manutenção e instalação.

O processo de resfriamento evaporativo não agride o meio ambiente, pelo fato de não utilizar gases CFC ou HFC e por ser um sistema que opera com renovação total de ar, elimina-se a recirculação de ar e também a proliferação de fungos e bactérias (CAMARGO, 2004).

Este processo tem como objetivo justamente aumentar o conforto térmico nos ambientes cotidianos, controlando a temperatura e umidade destes, e consiste basicamente em um processo limpo e renovável onde o ar e a água são os fluidos de trabalho, em que usa-se a água para provocar uma redução na temperatura do ar, aumentando assim o conforto nos ambientes.

Existem dois tipos de processos de resfriamento evaporativo, o RED (Resfriamento Evaporativo Direto) (Figura 1) onde o a água entra em contato direto com um fluxo de ar, onde o calor e massa transferidos entre o ar e a água reduzem a temperatura de bulbo seco do ar e aumentam a sua umidade, mantendo constante a entalpia (resfriamento adiabático), porém para que se obtenha menores temperaturas é necessário que a água recirculada que supre o equipamento deve antes ser resfriada (CARDOSO et al, 1999).

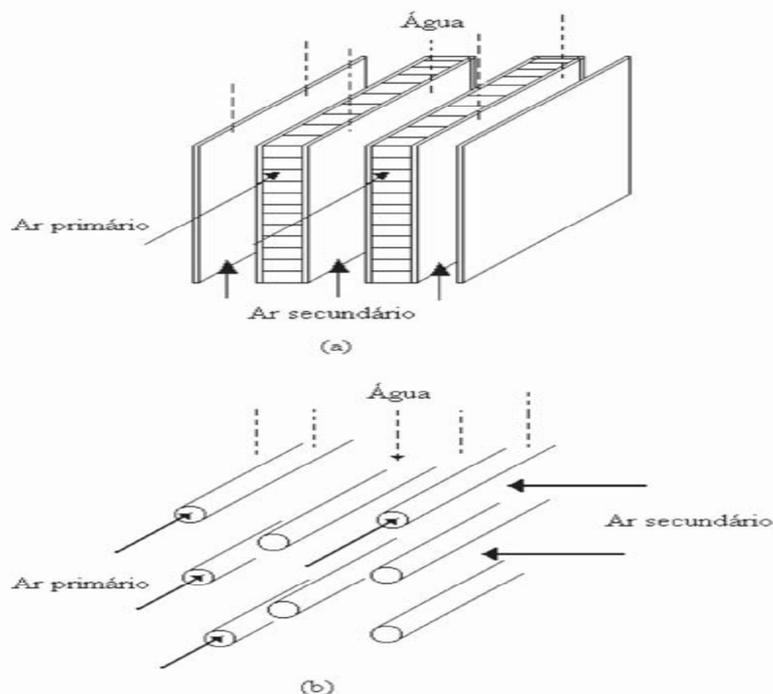


**Figura 1** - Resfriamento Evaporativo Direto

Fonte: CAMARGO, 2004, p. 70

E o REI (Resfriamento Evaporativo Indireto) (Figura 2) onde o ar primário, relativamente seco, não entra em contato diretamente com a água do sistema, ele fica isolado do ar do lado molhado onde ocorre a vaporização da água, neste processo o ar que será

utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor para uma corrente de ar secundário ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente, fazendo dessa forma com que a entalpia do ar do lado seco seja reduzida.



**Figura 2** - Resfriamento Evaporativo Indireto - (a) tipo placa; (b) tipo bulbo

Fonte: CAMARGO, 2004, p. 70.

De acordo com Morgado et al. (2011) a viabilidade do processo de resfriamento evaporativo depende diretamente da condição climática, pois o RED possui uma boa eficiência energética em condições onde a umidade relativa é baixa, já o REI tem maior eficiência onde existe maior umidade e maiores temperaturas.

A literatura mostra que o processo de resfriamento evaporativo é um processo limpo e renovável, que não infringe a natureza, pois utiliza apenas energia, ar e água para ocorrer, além disso a incidência do resfriamento evaporativo está crescendo cada vez mais com o objetivo de aumentar o conforto térmico nos ambientes em que o ser humano se localiza.

Camargo (2004) considera os sistemas de resfriamento evaporativo uma alternativa aos sistemas convencionais em muitas situações, ou mesmo podem ser utilizados em conjunto com os mesmos.

## **Materiais e métodos**

Para a coleta de dados foi necessário obter algum ambiente disponível para a realização do projeto e também de um equipamento de resfriamento evaporativo para ser utilizado para a coleta dos dados, e um ar-condicionado, para a comparação. Também foi necessário a utilização de equipamentos para monitorar as variáveis de conforto térmico (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e consumo de energia elétrica e ruído) envolvidas.

O ambiente escolhido para a realização da coleta de dados foi o Laboratório Casa 3 Superior, parte do complexo da Casa Inteligente da UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná) - Campus Cascavel, por se tratar de um ambiente com uma área de 21,1m<sup>2</sup> e um volume de 83,5m<sup>3</sup>, reproduzindo assim um ambiente comum de utilização cotidiana.

Os equipamentos utilizados para coletar os dados foram: 1 (um) Analisador de Energia Digital Portátil da *Instrutherm* (modelo AE-200) para quantificar a quantidade de energia elétrica consumida pelo climatizador e ar-condicionado, além de quantificar as variáveis que influenciam no consumo de energia; 2 (dois) Termo-Higro-Decibelímetro-Luxímetro da *Instrutherm* (modelo THDL-400) para coletar os dados referentes à temperatura interna e externa do ambiente e também da umidade relativa de ambos os ambientes e o ruído produzido; 1 (um) Anemômetro Digital da *Instrutherm* (modelo AD-250) para medir a velocidade do ar na entrada e na saída do sistema.

Além dos equipamentos para quantificar as variáveis, foram utilizados um climatizador modelo SS 18" da marca *Climattize* e um ar-condicionado modelo CCI10CBANA de 10.000BTU's da marca Consul, para que dessa maneira fosse realizada a comparação de consumo entre os dois sistemas de climatização e a posterior análise do processo de resfriamento evaporativo.



**Figura 3 - Climatizador SS 18"**



**Figura 4 - AD-250**



**Figura 4 - AE-200**



**Figura 5 - THDL-400**

Para a coleta de dados, escolheu-se monitorar a temperatura e umidade relativa do ar, interno e externo, a cada 3 minutos, intercalando as medições. O consumo de energia elétrica foi monitorado de 3 em 3 minutos, a velocidade do vento e o ruído produzido, uma vez a cada coleta de dados. Desta forma, foi possível obter um detalhamento maior de como as variáveis se comportam ao longo do período em que o equipamento permaneceu funcionando.

No período de realização da coleta de dados, foram realizadas 17 coletas durante 4 meses (Novembro/2013 a Fevereiro/2014), 14 delas em relação aos dados, temperatura e umidade relativa do ambiente interno e externo, velocidade do ar e consumo de energia elétrica, do climatizador e 3 referentes ao consumo de energia elétrica, do ar-condicionado. As coletas foram assim desenvolvidas: 4 medições realizadas em Novembro de 2013 com 12 horas (climatizador), 5 medições em Dezembro de 2013 com 12 horas (climatizador), 3 medições realizadas em Janeiro de 2014 com 15 horas (ar-condicionado) e 5 medições realizadas em Fevereiro de 2014 com 16 horas (climatizador), totalizando assim 55 horas de dados coletados. Eles foram organizados em tabelas e gráficos, para facilitar a visualização e o processo de análise.

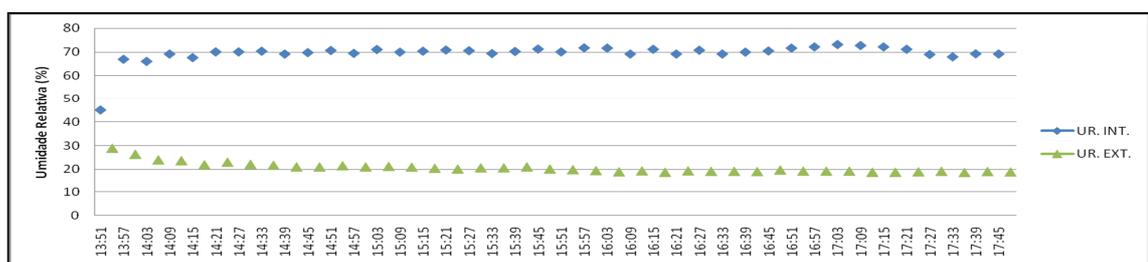
## Resultados e Discussão

Para que seja possível essa análise é necessário que se conheça quais são os parâmetros que afetam o conforto térmico. De acordo com a NBR 16401-2/2008 os fatores que afetam o conforto térmico são: temperatura operativa; velocidade do ar e umidade relativa do ar.

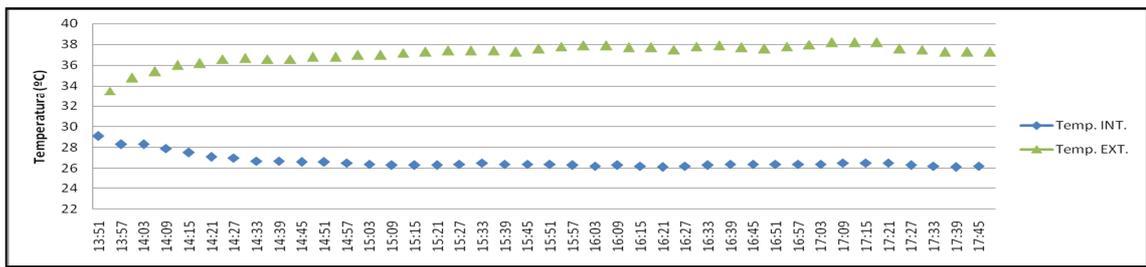
Primeiramente foi analisado a temperatura ambiente, tanto internamente quanto externamente, comparado os dados obtidos e indicando o decréscimo em graus celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) que o equipamento de resfriamento evaporativo foi capaz de proporcionar.

Juntamente com a análise da temperatura ambiente foi analisada a umidade relativa do ar interna e externa, que será expressa em porcentagem (%), visto que as duas variáveis foram quantificadas juntamente.

Com o equipamento de resfriamento evaporativo em pleno funcionamento, em uma das coletas de dados, notou-se um aumento máximo da umidade relativa do ambiente de até 48,7% (Figura 06), onde o ar externo tinha umidade relativa de 20,57% e o interno 69,33%, além da temperatura que sofreu um decréscimo máximo de  $10,5^{\circ}\text{C}$  (Figura 07), pois a temperatura interna era de  $26,64^{\circ}\text{C}$  e a externa de  $37,16^{\circ}\text{C}$ .

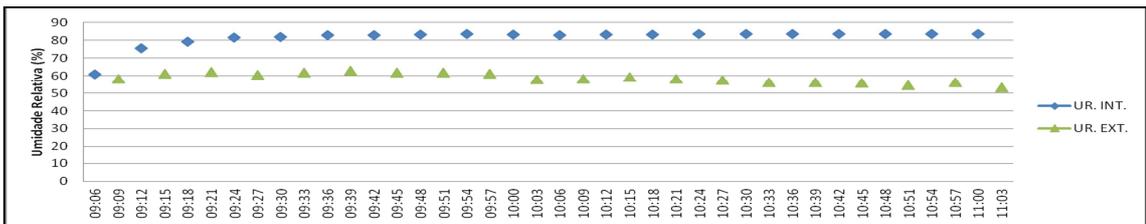


**Figura 6 - Umidade Relativa Interna X Umidade Relativa Externa**

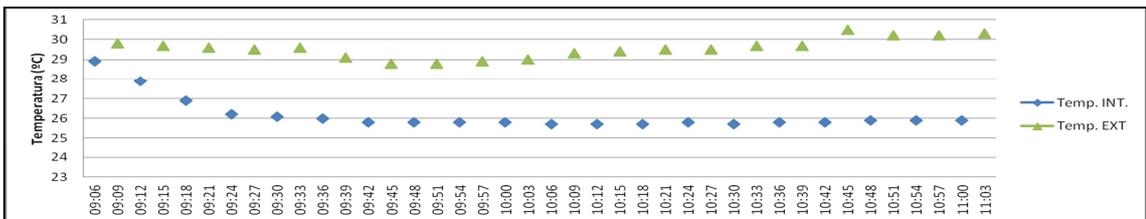


**Figura 7 - Temperatura Interna X Temperatura Externa**

Em outra situação de análise, durante uma coleta de dados, ocorreu um aumento mínimo da umidade relativa do ambiente de 14,4% (Figura 08), onde o ar externo tinha umidade relativa de 61,2% e o interno 75,6%, além da temperatura que sofreu um decréscimo mínimo de 1,8°C (Figura 09), pois a temperatura interna era de 27,9°C e a externa de 29,7°C.



**Figura 8 - Umidade Relativa Interna X Umidade Relativa Externa**



**Figura 9 - Temperatura Interna X Temperatura Externa**

Ainda de acordo com todos os dados coletados, o decréscimo médio máximo de temperatura foi de 6,53°C, onde a temperatura interna média era de 26,27°C e a externa de 32,8°C, e o decréscimo médio mínimo de temperatura foi de 3,4°C, onde a temperatura interna média era de 26,15°C e a externa de 29,55°C. Já o aumento médio máximo na umidade relativa foi de 33,78%, onde a umidade relativa interna média era de 77,59% e a externa de 43,81%, e o aumento médio mínimo na umidade relativa foi de 22,74%, onde a umidade relativa interna média era de 81,46% e a externa de 58,72%.

Essa grande variação na capacidade de climatização do processo de resfriamento direto se deve ao fato de que em situações onde a temperatura do ambiente externo não seja alta e a sua umidade esteja alta o equipamento tem dificuldade em retirar o calor e aumentar a umidade.

Por outro lado em situações em que a temperatura ambiente externa encontra-se alta e a sua umidade relativa baixa, o equipamento é eficiente na retirada de calor, diminuição da temperatura, e no aumento da umidade relativa do ar.

Com o objetivo de analisar mais profundamente a capacidade do equipamento de resfriamento evaporativo em questão faz-se necessário o cálculo da sua eficiência. Para esse cálculo tomou-se a situação em que houve o maior decréscimo de temperatura e o maior aumento da umidade relativa do ar.

Para o cálculo da eficiência do sistema de resfriamento evaporativo em questão, será utilizado a seguinte equação (RIANGVILAIKUL, 2010):

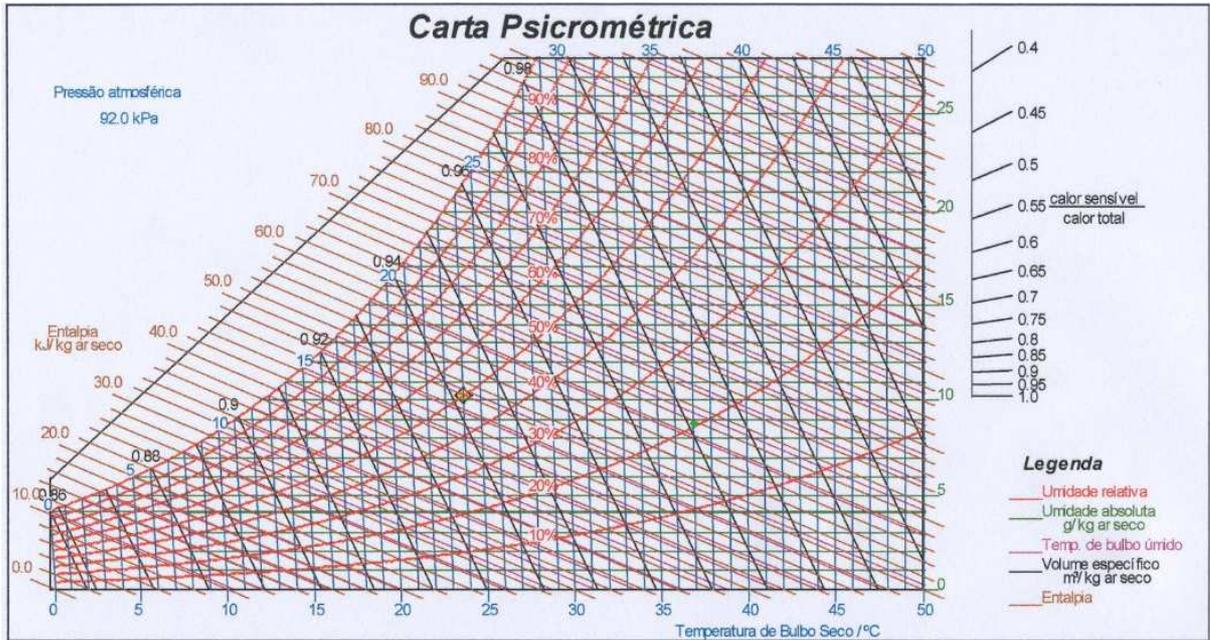
$$\varepsilon = \frac{TBS_e - TBS_s}{TBS_e - TBU_e} \times 100$$

em que,

TBS<sub>e</sub> é a temperatura de bulbo seco do ar na entrada do resfriador (°C), TBS<sub>s</sub> a temperatura de bulbo seco na saída do resfriador (°C) e TBU a temperatura de bulbo úmido na entrada do resfriador (°C).

Devido a impossibilidade de coletar dados referentes a temperatura de bulbo úmido esta grandeza será obtida através da utilização de uma carta psicrométrica, para que o cálculo obtenha o valor máximo da eficiência do resfriamento evaporativo, serão utilizados os dados coletados durante o dia 05/02/2014 no período da tarde, conforme critério citado anteriormente.

Para a obtenção da temperatura de bulbo úmido na entrada do sistema, entra-se com a temperatura de 37,16 °C e umidade relativa de 20,57%, entra-se com estes dados na carta psicrométrica abaixo (Figura 10) e obtém-se a temperatura de bulbo úmido na entrada do sistema.



**Figura 10 - Carta Psicrométrica**

Fonte: MARQUES, 1965.

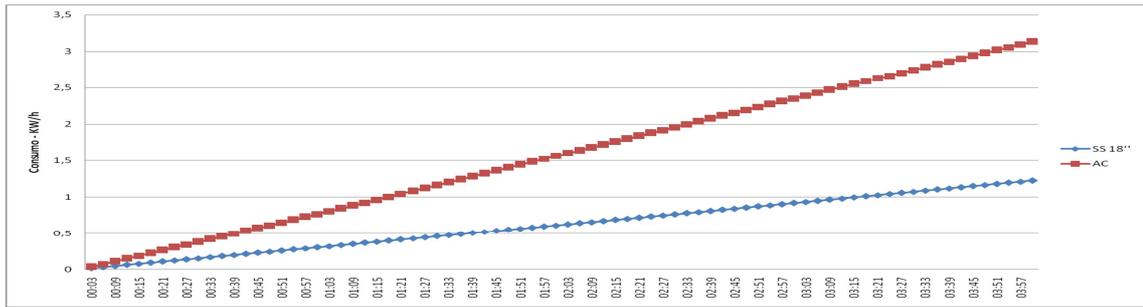
Assim, a temperatura de bulbo úmido na entrada do sistema é de aproximadamente 19,5°C. Através desses dados é possível calcular a eficiência do equipamento de resfriamento evaporativo analisado. O cálculo é representado abaixo:

$$\varepsilon = \frac{37,16 - 26,64}{37,16 - 19,50} \times 100 \qquad \varepsilon = \frac{10,52}{17,66} \times 100$$

$$\varepsilon = 0,5956 \times 100 \qquad \varepsilon = 59,56\%$$

Portanto a eficiência do equipamento analisado é de aproximadamente 60%, o que o torna útil em diversas aplicações e situações.

Também através da coleta de dados obteve-se que o consumo médio de energia elétrica do climatizador foi de 0,312kW/h e do ar-condicionado 0,805kW/h. Nota-se, portanto, uma redução de aproximadamente 62% (Figura 11) no consumo de energia elétrica.



**Figura 11** - Consumo Climatizador SS18" X Consumo Ar-Condicionado

A análise do equipamento de resfriamento evaporativo em relação ao conforto acústico por ele produzido dentro do ambiente foi realizada em função do ruído produzido pelo seu funcionamento, obtido através do equipamento THDL-400, além dos dados de velocidade na entrada e saída do sistema, coletados pelo equipamento AD-150.

A velocidade do ar na entrada do sistema de resfriamento evaporativo apresentou uma variação entre 2,3 m/s e 2,6 m/s, já na saída ocorreu variação entre 8,3 m/s e 8,9 m/s. Visto que a velocidade de saída do sistema é alta, isso gera um ruído excessivo que será abordado abaixo.

Devido a essa velocidade o equipamento foi capaz de gerar uma vazão de ar de 12672m<sup>3</sup>/h e visto que o ambiente tem volume de 83,5m<sup>3</sup>, ocorreram cerca de 152 renovações de ar por hora, dessa maneira o equipamento comporta-se como um bom circulador de ar, já que o ambiente não deve ser obrigatoriamente totalmente fechado.

O ruído produzido pelo sistema de resfriamento evaporativo variou de 85,9dB a 89,7dB (decibéis). Nota-se, portanto, que o ruído produzido devido ao seu funcionamento é alto, pois a NBR 10151/2000, especifica que o ruído máximo para o conforto acústico deve ser de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1** - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A)

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

**Tabela 01** - Ruído Máximo Permitido

Fonte: NBR 10151/2000, Pg 3.

Dessa maneira, o equipamento de resfriamento evaporativo não se enquadra no desempenho acústico estabelecido em norma, isso ocorre devido a velocidade do ar na sua saída ser relativamente alta, ocasionando ruído excessivo.

## **Conclusões**

Através dos dados coletados, pode-se afirmar que o processo de resfriamento evaporativo tem um menor consumo de energia quando comparado com o ar-condicionado, sendo capaz de reduzir em cerca de 60% o consumo de energia elétrica, além de propiciar umidade e temperatura interna que atenda a alguns requisitos necessários para causar um melhor conforto térmico do ambiente. Porém, destaca-se que não existe a possibilidade de controlar especificamente a umidade e temperatura desejadas. Mesmo com essa condição, o processo de resfriamento evaporativo apresenta-se como uma alternativa eficiente e viável na climatização de ambientes para a cidade de Cascavel-PR.

Porém, assim como afirma Morgado (2011), nota-se que o processo de resfriamento evaporativo perde eficiência em situações em que o ambiente externo se encontra a temperatura amena e umidade relativa do ar alta. Em contrapartida, em situações onde a temperatura do ambiente externo esteja alta e a sua umidade relativa do ar baixa o processo de resfriamento evaporativo é uma alternativa muito viável e eficaz, podendo inclusive substituir o ar-condicionado.

De acordo com os dados obtidos durante a pesquisa, a utilização da carta psicrométrica e das equações para o cálculo da eficiência do equipamento, obteve-se que esta eficiência para o equipamento analisado é em torno de 60%, o que o torna eficiente em situações de clima quente e seco.

Faz-se necessário uma observação em relação à velocidade do ar e ao ruído produzido pelo equipamento analisado, o qual produz um vento muito forte e ruído excessivo, que não atendem às especificações previstas em norma.

## **Agradecimentos**

Ao Programa PIBIC/CNPq/UNIOESTE que oportunizou e financiou a proposta de trabalho. À minha família, pelo apoio dado e ao Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, por ter orientado este projeto de pesquisa.

## **Referências**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 10151: Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando ao conforto da comunidade - Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2000. 4 p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 16401-2: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 7 p.

**CAMARGO, J. R.** "Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente", Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, SP. 2004.

**CARDOSO, S., CAMARGO, J. R., TRAVELHO, J. S.** "Introdução à utilização do resfriamento evaporativo para condicionamento de ar automotivo", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM99, Águas de Lindóia, SP. 1999.

**DATTA, S., SAHGAL, P. N., SUBRAHMANYAM, S., DHINGRA, S. C., KISHORE, V. V. N.** "Design and operating characteristics of evaporative cooling systems", Department of Chemical Engineering, Indian Institute of technology, New Delhi, India. 1986.

**MARQUES, Iomar A.** Termodinâmica Técnica, 4ª Ed. Págs. 261 – 283, Editora Científica – Rio de Janeiro - 1965.

**MORGADO, I. B., MELERO, S. T., NEILA, J. G., ACHA, C. R.** "Evaporative cooling efficiency according to climate conditions", 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, Madrid, Spain. 2011.

**RIANGVILAIKUL, B.; KUMAR, S.** "An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system" . Energy and Buildings, v.42, n.5, p.637-644, 2010.