

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO DE TROCADOR DE CALOR PARA CLIMATIZAÇÃO DE CONSTRUÇÕES AGROINDUSTRIAIS

MILTON SOARES¹, SAMUEL N. M. DE SOUZA², MARIA C. R. HALMEMAN³,
GUILHERME DE P. M. FRACARO⁴

RESUMO: No manejo de animais em propriedades rurais, é necessário o desenvolvimento de equipamentos de climatização de ambientes, tais como os resfriadores evaporativos. No presente estudo, foi construído e testado um resfriador evaporativo alternativo. O sistema é composto por um circuito de circulação de água impulsionada por uma bomba hidráulica e uma rede de tubulação em PVC formadora de uma cortina de água, uma calha condutora de água e um reservatório. A temperatura e a umidade relativa foram medidas na entrada e saída do equipamento, utilizando-se de termo-higrômetro digital, no período de 28 de novembro a 14 de dezembro de 2006 (dias quentes e secos do início de verão) e entre 6 e 13 de março de 2007 (dias quentes e úmidos). Associado a um sistema de ventilação forçada, o dispositivo apresentou, em três testes, resultados que indicaram que a temperatura do ambiente pode ser reduzida na faixa de 3 a 4 °C e com acréscimo de 10 a 12% de umidade relativa. A máxima eficiência evaporativa obtida foi de 47,6%.

PALAVRAS-CHAVE: trocador de calor, resfriamento, temperatura.

DEVELOPMENT OF AN ALTERNATIVE HEAT EXCHANGE SYSTEM FOR CLIMATIZATION OF AGROINDUSTRY FACILITIES

ABSTRACT: In the management of animals in rural areas, it is necessary the development of environment climatization devices, such as the evaporative coolings. In this study it was set up and tested an alternative evaporative cooling. The system consists in one circuit of water circulation pumped from a hydraulic pump and a net of PVC pipe which makes a water drapery, a water conductor gutter and a reservoir. The temperature and relative humidity were measured in the inlet and outlet of the device, with a digital hygrothermometer between November 28th and December 14th, 2006 (warm and dry days at the beginning of the summer) and between March 6th and 13th, 2007 (warm and humid days). Associated to a ventilation system, the device presented, in three complete phases of tests, results that indicated that the temperature of the environment can be limited to 3 to 4°C and with addition of 10 to 12% of relative humidity. The greatest evaporative efficiency found was 47.6%.

KEYWORDS: heat exchange, cooling, temperature.

INTRODUÇÃO

O Brasil, por sua extensão territorial, pela diversidade do clima e dos recursos ambientais, tem necessidade de criação de recursos técnicos para suprir as exigências diversificadas de produção nas diferentes regiões. Nas regiões Sul e Sudeste, especificamente, onde as temperaturas no verão são acentuadamente altas e no inverno bastante baixas, buscam-se soluções adequadas para climatização de ambientes onde os animais são alojados.

Variáveis como temperatura e umidade têm de ser controladas no ambiente produtivo, mas para isso é necessário o desenvolvimento de equipamentos de climatização de ambientes, os quais gastem o mínimo possível de energia, tornando as construções rurais mais sustentáveis.

¹ Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Medianeira - PR.

² Professor, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Cascavel - PR.

³ Professora, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Campo Mourão - PR.

⁴ Mestrando em Energia na Agricultura, UNIOESTE, Cascavel - PR.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 15-10-2007

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 8-3-2011

Estudos realizados por CAMPOS et al. (2009) & TURCO et al. (2006) comprovam que as condições climáticas regionais e a climatização adequada das instalações influenciam no desempenho produtivo dos animais. Uma alternativa viável para um efetivo controle de temperatura e umidade em construções rurais para alojamento de animais é a instalação de um sistema de resfriamento evaporativo

O resfriamento evaporativo consiste na passagem forçada de ar através de um painel poroso com circulação interna de água, onde a água, ao entrar em contato com o ar a uma temperatura maior, evapora por absorção de calor latente do ar, o qual, ao deixar o painel, apresenta temperatura menor e umidade relativa e específica maiores. Segundo TINOCO et al. (2004), os sistemas de resfriamento evaporativos tradicionais utilizam como materiais porosos a madeira, metal, mineral e vidro, dentre outros. Contudo, os materiais mais utilizados são placas de celulose ou palhadas vegetais, que apresentam desvantagem, tais como baixa durabilidade, dificuldade na aquisição e problemas com roedores.

A efetividade dos sistemas de resfriamento evaporativo está na faixa de 70 a 95% (RIANGVILAIKUL & KUMAR, 2010; VIGODERIS et al., 2007; WU et al., 2009).

O objetivo deste estudo foi o desenvolvimento de um sistema de resfriamento evaporativo para condicionamento do ar no interior de um galpão rural. Neste sistema, o ar, impulsionado por um exaustor, passa através de uma cortina de água. Após a montagem experimental, avaliou-se a temperatura, umidade relativa do ar na entrada do sistema de resfriamento e saída do sistema (interior do galpão), e a eficiência de resfriamento do sistema evaporativo proposto.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Unidade Oeste, Câmpus de Medianeira, Paraná, Brasil.

Foi montado um circuito de circulação de água constituído de três ramais de tubulação em PVC de 25 mm e com registros, para funcionamento individual ou simultâneo, os quais são chamados de ramais condutores de água, que permitem a recirculação da água no trocador. Cada ramal condutor foi perfurado com furos equidistantes de 3 mm (aspersores). A água recalçada pela motobomba de um reservatório (500 litros) passa pelos ramais e sai pelos furos, formando cortinas de água, sendo em seguida recuperada na calha e retorna ao reservatório. Podem ser formadas uma, duas ou três cortinas simultâneas de água, por meio do fechamento e abertura dos registros em cada ramal para reutilização. Na Figura 1, mostra-se o croqui do sistema proposto.

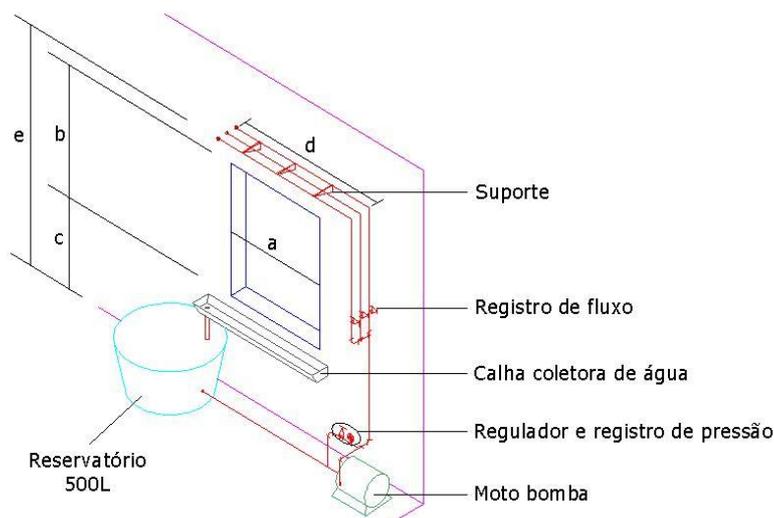


FIGURA 1. Isométrico do sistema para circulação de água, onde (a) 1.500 mm, (b) 950 mm, (c) 1.100 mm, (d) 1.900 mm, (e) 2.300 mm. **Isomeric of the water circulating circuit, where (a) 1500 mm, (b) 950 mm, (c) 1100 mm, (d) 1900 mm, (e) 2300 mm.**

A motobomba hidráulica utilizada é de baixa pressão, de fabricação Dancor, com potência de 1/3 cv, 3.400 rpm, 60 Hz, adaptada com um registro controlador de fluxo e também um medidor para controle de pressão do fluido.

Para compatibilizar a ação conjunta da ventilação forçada com o equipamento trocador de calor em estudo (cortina de água), foi utilizado um exaustor de ar da marca Emaf, modelo 103, com 0,50 m de diâmetro, tensão de 220 V, motor de 1/4 de HP, rotação de 1.100 rpm e vazão de ar de $105 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, com o acionamento realizado por um potenciômetro com ajuste de velocidade máxima e mínima.

O dispositivo experimental foi instalado num ambiente construído (galpão) com paredes e forro de madeira e coberto com telhas de amianto, com uma área total de $12,3 \text{ m}^2$, volume de $33,21 \text{ m}^3$ e pé-direito de 2,7 m. Na Figura 2, mostra-se a vista do trocador de calor instalado no ambiente: ao fundo, observa-se o detalhe de instalação do exaustor de ar e à frente o dispositivo de circulação de água.



FIGURA 2. Dispositivo de troca de calor experimental. **Experimental device of heat exchange.**

O exaustor instalado teve seu potenciômetro ajustado para velocidade máxima, que proporcionou uma velocidade do ar de 3 m s^{-1} , a qual foi aferida com um anemômetro portátil, da marca Lutron, modelo AM-4201, com escala de velocidade entre 0,4 e 30 m/s, com precisão de $\pm 3\%$.

Os dados de temperatura e umidade na saída do resfriador (interior do galpão) foram obtidos com a utilização de um termo-higrômetro digital marca Minipa, modelo MT-241, com escala de temperatura entre -50 e $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e precisão de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, e umidade relativa entre 20 e 90%, com precisão de $\pm 5\%$. Para a obtenção dos dados de temperatura e umidade de entrada do resfriador, utilizou-se de um termo-higrômetro marca Instrutemp, modelo HT-200, com faixa de medição de -20 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, precisão de $\pm 1\%$, e umidade relativa entre 20 e 99%, precisão de $\pm 5\%$. A obtenção dos valores de temperatura e de umidade relativa do ar, com os equipamentos mencionados, teve o seu desenvolvimento realizado em três testes, os quais constituem no controle da vazão da cortina de água no dispositivo mostrado na Figura 1:

- T1: Para o primeiro teste, foi utilizado somente um ramal condutor de água, ficando os outros dois ramais inativos, ou seja, com seus registros controladores de fluxo, fechados, formando uma cortina de água.
- T2: No segundo teste, foram utilizados dois ramais condutores de água simultaneamente, permanecendo um ramal inativo, com o seu respectivo registro controlador de fluxo fechado, formando duas cortinas simultâneas de água.
- T3: Para o terceiro teste, foram utilizados os três ramais condutores de água concomitantemente, formando três cortinas simultâneas de água.

Os testes T1, T2 e T3 foram realizados nos períodos de novembro a dezembro de 2006, o qual apresentava uma temperatura ambiente média de 32,6 °C e março de 2001, com uma temperatura ambiente média de 34,4 °C.

O teste T1 foi realizado nos dias 28-11-2006, 4-12-2006, 12-12-2006, 6-3-2007 e 9-3-2007.

O teste T2 foi realizado nos dias 29-11-2006, 5-12-2006, 13-12-2006, 7-3-2007 e 12-3-2007.

O teste T3 foi realizado nos dias 30-11-2006, 6-12-2006, 14-12-2006, 8-3-2007 e 13-3-2007.

Para cada um dos dias de testes descritos acima, foram obtidos dados de temperatura e umidade às 10; 11; 12; 13; 14; 15 e 16 h, com funcionamento ininterrupto dos equipamentos de medição, sendo que o monitoramento foi executado a cada hora, num total de sete vezes. Para efeito de análise do desempenho do equipamento, utilizaram-se somente os dados correspondentes às 13 h e 16 h, ou seja, deveria haver um período de três horas (das 10 às 13 h) para que o equipamento atingisse a condição de regime permanente.

O delineamento experimental estatístico adotado foi o DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado), com dois tratamentos e cinco repetições. A unidade experimental adotada foi a média da temperatura e a média da umidade relativa do ar. O evento teve um total de dez medidas para cada variável, em cada hora de coleta. As medições foram realizadas às 10 h, 11 h, 12 h, 13 h, 14 h, 15 h e 16 h e foram realizadas em três etapas que consistiram na atividade de passagem da água pelos ramais de tubulação. O T1 foi realizado com a passagem de água em um ramal de tubulação, o T2 com a passagem de água em dois ramais de tubulação e o T3 com a passagem de água por três ramais de tubulação.

A eficiência evaporativa do sistema evaporativo foi calculada por meio da eq.(1) (VIGODERIS et al., 2007; RIANGVILAIKUL et al., 2010):

$$\varepsilon = \frac{\text{TBS}_e - \text{TBS}_s}{\text{TBS}_e - \text{TBU}_e} 100 \quad (1)$$

em que,

TBS_e - temperatura de bulbo seco do ar na entrada do resfriador (°C);

TBS_s - temperatura de bulbo seco na saída do resfriador (°C), e

TBU_e - temperatura de bulbo úmido na entrada do resfriador (°C).

$$\varepsilon = \frac{\text{TBS}_e - \text{TBS}_s}{\text{TBS}_e} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As observações dos valores coletados no período de testes realizados para todas as etapas, apresentaram os resultados que configuram o desempenho do equipamento trocador de calor proposto, e os valores foram discutidos nos itens que se seguem. A Tabela 1 mostra as médias de temperatura (°C) na entrada e saída do resfriador, nos testes T1, T2 e T3.

No T1 e T2, às 13 h e 16 h, os resultados mostraram que houve diferença estatisticamente significativa entre os valores de temperatura interna e externa, quando comparados, em que a temperatura apresentou uma queda aproximada de 4,2 °C no T2 às 16 h.

Comparando com resultados de ensaios de outros equipamentos de resfriamento evaporativo com painel constituído de materiais inovadores, em que WU et al. (2009) obtiveram uma queda de temperatura de 6,7 °C e , conclui-se que a queda de temperatura obtida com o equipamento em estudo seria significativa.

TABELA 1. Médias de temperatura (°C) na entrada e saída do equipamento para os testes T1, T2 e T3. **Average of inlet and outlet temperature (°C) of the device for the tests T1, T2 and T3.**

Horas	Temperatura	Média	F	Valor-P	F crítico	Condição
Teste T1						
13 h	Entrada	34,88	11,1075	0,01034	5,31764	*
	Saída	32,44				
16 h	Entrada	35,94	16,4502	0,00365	5,31764	*
	Saída	31,78				
Teste T2						
13 h	Entrada	34,88	12,4770	0,00771	5,31764	*
	Saída	32,66				
16 h	Entrada	36,34	15,9749	0,0040	5,31764	*
	Saída	32,60				
Teste T3						
13 h	Entrada	31,16	2,02085	0,19294	5,31764	NS
	Saída	28,20				
16 h	Entrada	31,44	2,5450	0,14931	5,31764	NS
	Saída	27,76				

No T3, observou-se que não houve diferença estatisticamente significativa para esse teste, ou seja, o equipamento apresentou um resultado desfavorável. A maior vazão da cortina de água impediu uma ação mais eficiente de passagem do ar da entrada para a saída do dispositivo.

Na Tabela 2, apresentam-se as médias de umidade relativa (%) na entrada e saída do resfriador, nos testes T1, T2 e T3.

TABELA 2. Médias de umidade (%) na entrada e saída do equipamento para os testes T1, T2 e T3. **Average of inlet and outlet humidity (%) of the device for the tests T1, T2 and T3.**

Horas	Umidade	Média	F	Valor-P	F crítico	Condição
Teste T1						
13 h	Entrada	42,32	8,48718	0,01949	5,31764	NS
	Saída	55,26				
16 h	Entrada	43,84	5,78272	0,042286	5,31764	*
	Saída	54,66				
Teste T2						
13 h	Entrada	47,08	0,59753	0,46175	5,31764	NS
	Saída	52,38				
16 h	Entrada	45,70	1,08206	0,32865	5,31764	NS
	Saída	51,98				
Teste T3						
13 h	Entrada	55,50	0,3461	0,57256	5,31764	NS
	Saída	58,40				
16 h	Entrada	54,12	1,20857	0,30359	5,31764	NS
	Saída	58,92				

Pela análise de variância realizada, no teste T1 houve um aumento estatisticamente significativo da umidade relativa do ar, acusando um aumento médio na faixa de 11 a 13%. Isso se deve a um maior contato do ar com a cortina de água, em função da menor vazão da mesma.

Para os testes T2 e T3, observa-se que não há uma diferença estatisticamente significativa para os valores das umidades relativas nos horários das 13 e 16h, no máximo 6,3% de aumento às 16h no teste T2.

Na Tabela 3, mostram-se os valores da eficiência evaporativa obtida para os três testes, calculada por meio da eq.(1).

TABELA 3. Eficiência (%) do resfriamento evaporativo para os testes T1, T2 e T3. **Evaporative efficiency for the tests T1, T2 and T3.**

Horas	T1	T2	T3
13 h	23,00	23,67	38,64
16 h	38,03	35,50	47,55

Dentre os três processos analisados, a etapa III, onde a vazão de água foi a maior, ou seja, três cortinas simultâneas de água, as eficiência evaporativas foram maiores. Quando se compara a eficiência evaporativa às 16h para a etapa III, a qual corresponde a 47,55% com valores encontrados por VIGODERIS et al. (2007), 62,57%, utilizando painel com placas de argila expandida, e por RIANGVILAIKUL & KUMAR (2010), 92%, utilizando um processo onde o ar dava dois passes no painel. O sistema experimental proposto apresenta baixas eficiências porque não passa por um painel, mas por cortinas de água. Por outro lado, o sistema proposto é de construção mais simples e pode ser aplicado na área rural, em processos de umidificação e resfriamento do ar.

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados das análises que procederam ao experimento do sistema alternativo de trocador de calor para climatização de construções agroindustriais, quando ensaiado em condições de trabalho, concluiu-se que:

- O equipamento construído, quando comparado com outros resfriadores (RIANGVILAIKUL & KUMAR, 2010; WU et al., 2009) é de construção mais simples.
- Para ambientes nos quais a temperatura necessite de um índice de queda na faixa de 3 a 4 °C com acréscimo de umidade relativa na faixa de 10 a 12%, o equipamento mostra-se favorável.
- O teste T3, onde se utilizou uma vazão maior de água, apresentou uma eficiência evaporativa maior, aproximadamente 47,6%.

REFERÊNCIAS

- CAMPOS, J.A.; TINÔCO, I.F.F.; BAETA, F.C.; CECON, P.R.; MAURI, A.L. Qualidade do ar, ambiente térmico e desempenho de suínos criados em creches com dimensões diferentes. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.3, p.339-347, 2009.
- RIANGVILAIKUL, B.; KUMAR, S. A experimental study of a novel dew point evaporative cooling system. *Energy and Buildings*, Lousanne, v.42, n.5, p.637-644, 2010.
- TINÔCO, I.F.F.; FEGUEIREDO, J.L.A.; SANTOS, R.C.; SILVA, J.N.; PUGLIESI, N.L. Placas porosas utilizadas em sistemas de resfriamento evaporativo. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa-MG, v.12, n.1, p.17-23, 2004.
- TURCO, S.H.N.; SILVA, T.G.F.; SANTOS, L.F.C.; RIBEIRO, P.H.B.; ARAÚJO, G.G.L.; HOLANDA JÚNIOR, E.V.; AGUIAR, M.A. Zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no Estado da Bahia. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.20-27, 2006.
- VIGODERIS, R.B.; TINÔCO, I.F.F.; LACERDA FILHO, A.F.; SILVA, J.N.; GATES, R.S.; PAULI, D.G.; SILVA, C.E.; GUIMARÃES, M.C.C. Construção de túnel de vento reduzido,

visando à avaliação de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo para arrefecimento térmico em galpões de produção animal. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa-MG, v.15, n.3, p.191-199, 2007.

WU, J.M.; HUANG, X.; ZHANG, H. Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*, Oxford, v.29, n.5, p.980-984, 2009.