



JOÃO LEVI BASTOS FERNANDES

**EFEITO DO PRÉ-RESFRIAMENTO DA ÁGUA EM PLACAS
POROSAS DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO
EVAPORATIVO**

LAVRAS – MG

2020

JOÃO LEVI BASTOS FERNANDES

**EFEITO DO PRÉ-RESFRIAMENTO DA ÁGUA EM PLACAS POROSAS DE
SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior

Coorientadora

Profa. Dra. Giselle Borges de Moura

**LAVRAS - MG
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Fernandes, João Levi Bastos.

Efeito do pré-resfriamento da água em placas porosas de sistemas de resfriamento evaporativo / João Levi Bastos Fernandes. - 2020.

51 p. : il.

Orientador(a): Tadayuki Yanagi Júnior.

Coorientador(a): Giselle Borges de Moura.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Climatização de instalações agropecuárias. 2. Sistema evaporativo. 3. Conforto térmico. I. Júnior, Tadayuki Yanagi. II. de Moura, Giselle Borges.

JOÃO LEVI BASTOS FERNANDES

**EFEITO DO PRÉ-RESFRIAMENTO DA ÁGUA EM PLACAS POROSAS DE
SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO**

***PRE-CHILLED WATER EFFECT ON POROUS PLATES OF EVAPORATIVE
COOLING SYSTEMS***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de fevereiro de 2020.

Prof. Tadayuki Yanagi Junior	UFLA
Prof (a). Giselle Borges de Moura	UFLA
Prof. Francisco Carlos Gomes	UFLA
Prof (a). Ilda de Fátima Ferreira Tinôco	UFV

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

A Deus, que nos criou. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à Deus, pela vida e possibilidade de sempre agregar novos conhecimentos.

A meus pais e demais familiares, principalmente minha esposa Jaqueline pela paciência e amor.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), CAPES, e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador, professor Dr. Tadayuki Yanagi Junior pelas inúmeras correções e sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

A professora Dra. Giselle Borges de Moura, pela disposição e apoio como coorientadora.

Ao professor Dr. Alex de Oliveira Ribeiro e demais docentes que muito auxiliaram nesta incessante busca por novos conhecimentos e, principalmente, pelo aprendizado profissional.

A todos meus colegas servidores desta instituição, que hoje chamo de amigos, obrigado pelo apoio e pelo estímulo que nunca faltou.

Por fim, o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação.

Muito obrigado!

“O coração do homem traça o seu caminho, mas
o Senhor lhe dirige os passos.”

(Provérbios 16:9)

RESUMO

O controle térmico no interior de diversas instalações agropecuárias é um tema que tem demandado diversas pesquisas. Desta forma, objetivou-se com o presente trabalho, avaliar o efeito do pré-resfriamento da água aplicada em placas porosas de sistemas de resfriamento evaporativo. O experimento foi realizado em dois modelos físicos construídos em escala reduzida e distorcida com resfriamento evaporativo por meio de painéis de celulose com molhamento por meio de água resfriada (SRAR) e sistema idêntico ao anterior, porém com molhamento do painel por meio de água natural (SRAN). Mensurou-se a temperatura de bulbo seco (t_{bs}), temperatura de globo negro (t_{gn}) e umidade relativa (UR) do ar no interior dos modelos físicos e no ambiente externo em intervalos de 10 s. Os modelos físicos representam instalações agropecuárias equipadas com ventilação do tipo túnel de vento com pressão negativa. A partir dos dados mensurados, calculou-se os índices de temperatura e umidade (ITU) e de temperatura do globo negro e umidade (ITGU), a entalpia (h) e a efetividade de resfriamento (ϵ) em ambos os modelos físicos construídos em escala reduzida. O pré-resfriamento da água usada no molhamento de placas porosas de sistemas de resfriamento evaporativo proporcionou maior redução nas variáveis térmicas e índices de conforto em relação ao molhamento com água à temperatura ambiente.

Palavras-chave: Climatização de instalações agropecuárias, sistema evaporativo, conforto térmico.

ABSTRACT

Thermal control inside several agricultural facilities is an issue that has required several researches. Thus, the aim of this study was to evaluate the pre-chilled water effect applied on porous plate of evaporative cooling systems. The experiment was carried out on two physical models built on a small and distorted scale with evaporative cooling through cellulose panels with wetting by chilled water (CWCS) and an identical system to the previous one, however with panel wetting by natural water (NWCS). Air dry-bulb temperature (t_{db}), black-globe temperature (t_{bg}) and air relative humidity (RH) were measured inside of the physical models and the external environment at 10 seconds interval. Physical models represent agricultural facilities equipped with ventilation as negative pressure wind tunnel. From the measured data, the temperature-humidity index (THI), the black globe-humidity index (BGTH), the enthalpy (h) and the cooling effectiveness (ϵ) were calculated in both physical models built in reduced scale. The pre-chilled water used in porous plates wetting of evaporative cooling systems provided a greater reduction in thermal variables and comfort indexes compared to wetting with water at room temperature.

Keywords: Agroindustry facilities cooling, evaporative system, thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Resfriamento evaporativo direto (DED).	16
Figura 2	Resfriamento evaporativo indireto (REI).	17
Figura 3	Resfriamento evaporativo direto e indireto em carta psicrométrica.	18
Figura 4	Comportamento das temperaturas do ar para um resfriamento evaporativo direto ideal.	19

SEGUNDA PARTE

Figura 1	Montagem experimental em perspectiva, Planta Baixa e Corte AB do modelo físico de aviários com sistema de resfriamento da placa de celulose com água natural (SRAN) e água resfriada (SRAR). Os pontos no Corte AB indicam as posições de medição das temperaturas de bulbo seco do ar e globo negro (t_{bs} e t_{gn}) e umidade relativa do ar (UR). Detalhamento sem escala.	48
Figura 2	Comportamento da efetividade de resfriamento do ar em função da temperatura da água usada para o molhamento da placa porosa ($t_{\text{água}}$) e do déficit de pressão de vapor (DPV).	51

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1	Temperatura de conforto térmico para frangos de corte em diferentes idades.	21
Tabela 2	Limites de índices ambientais e de propriedade termodinâmica para criação de frangos de corte adultos.	22
Tabela 3	Necessidades de ar ($L \text{ ave}^{-1} \text{ m}^{-1}$) em função da temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e da idade de frangos de corte (semanas).	26
Tabela 4	Necessidades de ventilação, em m^3 de ar/hora/peso corporal de frangos de corte.	26
Tabela 5	Velocidades máximas do ar no nível dos frangos de corte em função dos meses (em dias de vida).	27

SEGUNDA PARTE

Tabela 1	Equações usadas para o cálculo dos índices de avaliação do ambiente térmico, propriedade termodinâmica do ar e efetividade de resfriamento evaporativo do ar.	49
Tabela 2	Teste t de Student aplicado para comparação das respostas térmicas e de efetividade de resfriamento dos modelos em escala reduzida equipados com sistemas de resfriamento evaporativo do tipo placa porosa umedecida, nas fases de pré-teste e teste.	50

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

DIC	Delineamento inteiramente casualizado;
DPV	Déficit de pressão vapor, kPa;
h	Entalpia, kJ kg ar seco ⁻¹ ;
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia;
ITE	Índice de temperatura efetiva;
ITGU	Índice de temperatura de globo negro e umidade;
ITU	Índice de temperatura e umidade;
RED	Refrigeração evaporativa direta;
REI	Refrigeração evaporativa indireta;
SRAN	Sistema de Resfriamento com Água Natural;
SRAR	Sistema de Resfriamento com Água Resfriada;
$t_{\text{água}}$	Temperatura da água, °C;
$t_{\text{água n}}$	Temperatura da água natural, °C;
$t_{\text{água r}}$	Temperatura da água resfriada, °C;
t_{bs}	Temperatura de bulbo seco do ar, °C;
t_{bu}	Temperatura de bulbo úmido do ar, °C;
t_{gn}	Temperatura de globo negro, °C;
t_{po}	Temperatura de ponto de orvalho do ar, °C;
t_{sp}	Temperatura superficial da placa de resfriamento evaporativo, °C;
UR	Umidade relativa, %;
V_{ar}	Velocidade do ar, m s ⁻¹ ;
Δh	Diferença entre a entalpia interna e externa;
ΔITGU	Diferença entre o índice de temperatura de globo negro e umidade interno e externo;
ΔITU	Diferença entre o índice de temperatura e umidade interno e externo;
Δt_{bs}	Diferença entre a temperatura de bulbo seco do ar interna e externa, °C;
Δt_{gn}	Diferença entre a temperatura de globo negro interna e externa, °C;
Δt_{po}	Diferença entre a temperatura de ponto de orvalho do ar interna e externa, °C.
ΔUR	Diferença entre a umidade relativa do ar interna e externa, %;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Sistema de resfriamento evaporativo	14
2.1.1 Tipos de resfriadores evaporativos	14
2.1.1.1 Resfriador evaporativo direto	15
2.1.1.2 Resfriador evaporativo indireto	16
2.1.2 Processos psicométricos associados ao resfriamento evaporativo	17
2.1.3 Efetividade de resfriamento	18
2.2 Ambiente térmico para a criação de frangos de corte	20
2.3 Impactos dos extremos climáticos na produção avícola	21
2.4 Desafios térmicos e sua avaliação	22
2.5 Sistemas de renovação de ar e ventilação	24
2.6 Influência da ventilação na melhoria do conforto térmico para frangos de corte	25
2.7 Climatização das instalações para frangos de corte	27
2.8 Uso de modelos físicos em escala reduzida na avicultura	28
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS	30
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	35

1 INTRODUÇÃO

O controle do ambiente térmico no interior de instalações agropecuárias é um tema que tem demandado diversas pesquisas na área de ambiência, principalmente em regiões onde o clima é severo, com registros de altas temperaturas do ar em longos períodos do ano.

Neste contexto, a adoção de sistemas de produção climatizados, com controle de temperatura e umidade relativa do ar, tem se intensificado. Dentre os sistemas de climatização, aqueles que são equipados com ventilação com pressão negativa e resfriamento evaporativo tem se destacado devido a possibilidade de proporcionar melhores condições térmicas no interior das instalações.

O resfriamento evaporativo pode ser obtido por meio da nebulização ou de placas porosas umedecidas. Estas últimas têm sido estudadas por diversos pesquisadores e empresas do ramo, sendo que, a sua efetividade de resfriamento pode ser ampliada com uso de diferentes materiais em sua composição. Esta efetividade será gradativamente maior com a elevação da temperatura ambiente no interior das instalações e redução da umidade relativa do ar. Em substituição a essas placas de celulose, consideradas de alto custo e de baixa durabilidade, o uso de argila expandida e fibras vegetais como material poroso de placas, são exemplos de alternativas para sistemas de resfriamento evaporativo do ar.

Em adição ao uso de diferentes materiais porosos para composição das placas nos sistemas de resfriamento evaporativo, poder-se-á ainda, fazer o resfriamento da água de molhamento das placas de porosas visando a melhoria das condições térmicas no interior das instalações agropecuárias.

Diante deste contexto, objetivou-se com o presente trabalho, avaliar a efetividade do pré-resfriamento da água utilizada para molhamento de uma placa porosa de celulose em um modelo físico construído em escala reduzida distorcida.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A retirada do calor do ambiente por meio da evaporação da água ocorre sob a forma de calor latente. Segundo Rivero (1985), denomina-se calor latente a energia térmica associada com uma mudança de estado do corpo, quando não ocorrem variações de sua temperatura. Por sua vez, o calor sensível é a transferência de energia que se pode perceber por meio de variações de temperatura.

O calor é produzido no corpo pelas atividades metabólicas, mas, também pode ser absorvido a partir do exterior por meio de radiação, condução e convecção (Nascimento, 2005). Portanto, pode-se utilizar o resfriamento evaporativo para mitigar os efeitos das reações metabólicas em animais, bem como, para reduzir o desconforto térmico em edificações.

O sistema de resfriamento evaporativo também é amplamente utilizado em alguns setores agropecuários como na produção de frutas e hortaliças, e, na criação de aves, suínos e bovinos, que dependem de condições térmicas específicas e adequadas para se desenvolverem adequadamente. Especificamente, na avicultura de corte, o resfriamento evaporativo é amplamente utilizado, uma vez que as aves precisam de condições térmicas específicas ao longo do ciclo produtivo.

2.1 Sistema de resfriamento evaporativo

Para Camargo (2003), um dos processos de resfriamento mais utilizados, devido sua facilidade de instalação, manutenção e operação, é o resfriamento evaporativo, que utiliza a evaporação de água para resfriar uma corrente de ar. Uma de suas principais características é apresentar maior efetividade em condições de elevadas temperaturas do ar e baixas umidades relativas.

2.1.1 Tipos de resfriadores evaporativos

Os equipamentos de resfriamento evaporativo podem ser de refrigeração evaporativa direta (RED) ou de refrigeração evaporativa indireta (REI). Os equipamentos de refrigeração direta resfriam um gás por contato direto com uma superfície líquida, com uma superfície sólida molhada ou, ainda, através de *sprays*. Nos equipamentos de refrigeração indireta, o ar se

mantém separado do processo de evaporação da água, portanto apenas o calor sensível é transferido para a corrente de ar secundária (CAMARGO, 2009).

Contudo, segundo Givoni (1994), além dos sistemas de resfriamento evaporativo de refrigeração direta e indireta, tem-se também:

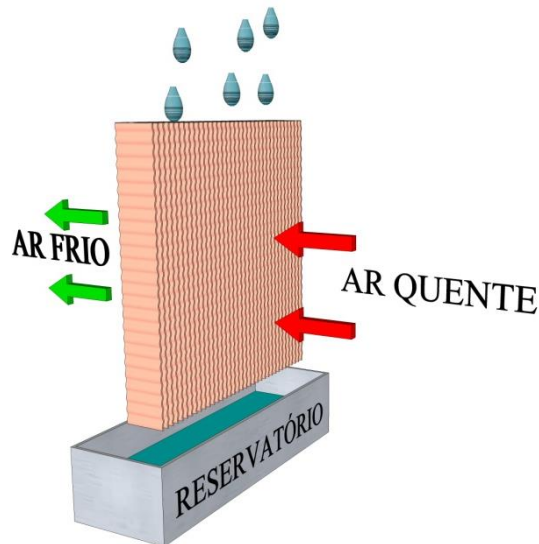
- Resfriamento evaporativo em duplo estágio: sistemas que utilizam o processo direto e o indireto.
- Resfriamento passivo: quando a evaporação ocorre naturalmente, sem consumo de energia, como no caso de uso de vegetação, de fontes d'água, torres de resfriamento e tanques na cobertura.
- Resfriamento semipassivo: Sistemas em que a evaporação é promovida ou intensificada através de dispositivos mecânicos.

2.1.1.1 Resfriador evaporativo direto

Bastos (2011), afirmou que, quando a água em estado líquido entra em contato com o ar de alimentação a ser inserido no ambiente climatizado ocorre o resfriamento evaporativo direto. O calor sensível presente no ar de alimentação evapora a água em estado líquido, e como resultado, tem-se a redução da temperatura do ar e aumento da sua umidade relativa. O processo de evaporação continua até que o ar esteja saturado e a mistura de ar e vapor entrem em equilíbrio. Um resfriamento evaporativo ideal é o adiabático, ou seja, nenhum calor entra ou sai do sistema, e ocorre somente quando a água de resfriamento está na temperatura de bulbo úmido (t_{bu}) do ar. Em alguns casos o processo real diferencia-se do ideal, pois a água de resfriamento introduz uma parcela de calor sensível ao sistema. Ou seja, o processo não é adiabático, e o ar não é resfriado a uma entalpia e t_{bu} constantes.

Segundo Camargo (2004), no resfriador evaporativo direto não há resfriamento real (redução na entalpia), a menos que se reduza a temperatura da água recirculada que supre o equipamento, assim, a mínima temperatura que se pode atingir é a de bulbo úmido do ar que entra no sistema. A passagem da corrente de ar umidifica e resfria adiabaticamente o ar que entra em contato com uma superfície úmida ou com gotículas de água (Figura 1).

Figura 1: Resfriamento evaporativo direto (RED).



Fonte: Do autor (2020)

Bastos (2011), ainda afirma que o calor pode ser transferido no sistema por outras fontes, como por exemplo, pela radiação solar. O modelo evaporativo direto possui limitações, pois a quantidade de calor sensível removido não pode ser maior que o calor latente necessário para saturar o ar com vapor d'água. Outro fator limitante decorre do seu próprio processo: uma vez que utiliza o ar externo diretamente para a climatização, este modelo evaporativo é mais sensível às condições externas, sendo mais eficiente em locais de maior temperatura e menor umidade relativa do ar. Ao utilizar este processo, é preciso ser cauteloso para não elevar em excesso a umidade relativa do ambiente, o que pode levar a um desconforto térmico maior em alguns casos.

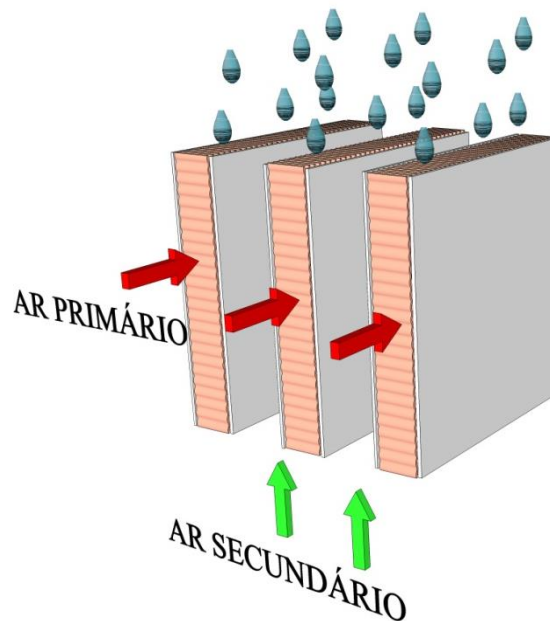
2.1.1.2 Resfriador evaporativo indireto

Em contrapartida, no resfriador evaporativo indireto, a transferência de calor do ar utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) para uma corrente de ar secundária ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente, faz com que a entalpia do ar do lado seco seja reduzida (CAMARGO, 2004).

Segundo Bastos (2011), o ar secundário é o ar que entra em contato com a água e que ajuda na evaporação, resfriando as superfícies do trocador de calor, que efetivamente resfriam o ar primário. O ar secundário normalmente é proveniente do ambiente externo e é descartado após o seu uso, conforme ilustrado na Figura 2, em que este ar entra na parte inferior, e após

trocar calor com a superfície externa, ele é descartado na parte superior por meio do uso de um ventilador secundário. Os elementos de maior importância dos sistemas evaporativos indiretos são as superfícies do trocador de calor que separam o ar de alimentação do ar secundário e da água em que este último ar está evaporando. As superfícies absorvem calor do ar de alimentação e transferem para o ar secundário úmido, que é descartado. As superfícies podem ser placas ou tubos, de metal ou de plástico, ou outras configurações. São exigidos das superfícies uma boa condutividade térmica, separação das duas correntes de ar e resistência à corrosão.

Figura 2: Resfriamento evaporativo indireto (REI).

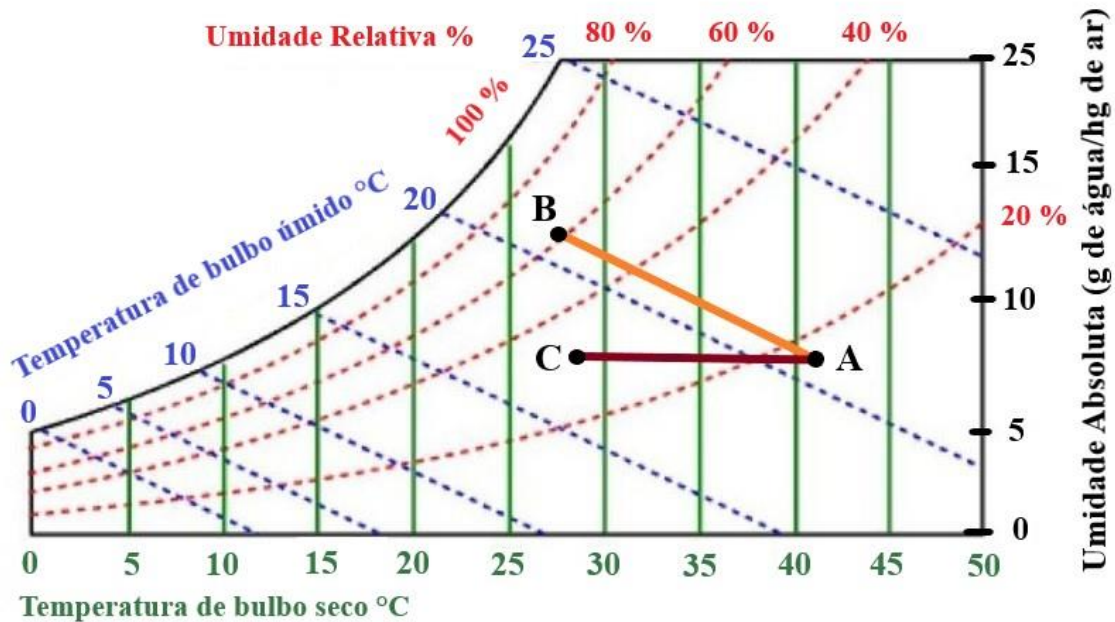


Fonte: Do autor (2020)

2.1.2 Processos psicométricos associados ao resfriamento evaporativo

De acordo com Hellickson e Walker (1983), o resfriamento sensível, ou resfriamento evaporativo indireto é o resfriamento a uma taxa de umidade absoluta constante. Um exemplo é o ar que passa por uma bobina com temperatura superficial acima da temperatura do ponto de orvalho do ar. O resfriamento sensível é representado entre os pontos A e C da Figura 3, como uma linha horizontal da direita para a esquerda.

Figura 3: Resfriamento evaporativo direto e indireto em carta psicrométrica.



Fonte: Do autor (2020)

Ainda segundo Hellickson e Walker (1983), o resfriamento evaporativo direto é essencialmente um processo de saturação adiabática (sem ganho ou perda de calor). Está representado na figura 3 como uma linha inclinada da direita para a esquerda, entre os pontos A e B. O ar a ser resfriado entrou em contato com a água a uma temperatura igual à temperatura do bulbo úmido do ar. O calor sensível do ar inicial evapora a água, diminuindo a temperatura de bulbo seco do ar. O calor sensível é convertido em calor latente, para que o processo seja adiabático.

2.1.3 Efetividade de resfriamento

Conforme Camargo (2009), a efetividade (ϵ) de um resfriamento evaporativo direto pode ser definida como a taxa entre a queda real da temperatura de bulbo seco do ar e a máxima queda teórica que a t_{bs} poderia ter se o resfriamento fosse 100% eficiente e o ar saísse saturado. Neste caso, t_{bs} na saída seria igual a t_{bu} na entrada (TRADE, 1978). A efetividade é definida pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{t_{bse} - t_{bss}}{t_{bse} - t_{bue}} \times 100$$

em que:

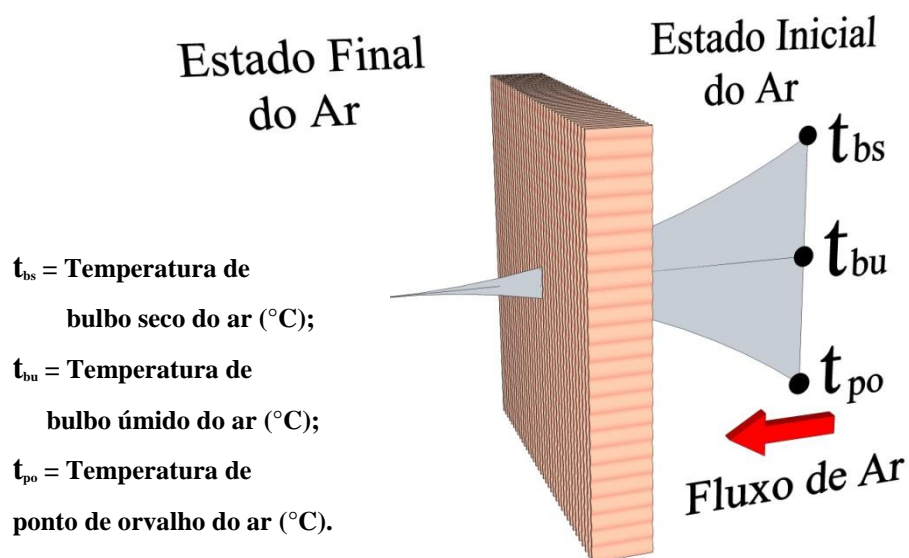
t_{bse} : Temperatura de bulbo seco do ar na entrada das placas evaporativas (°C);

t_{bss} : Temperatura de bulbo seco do ar na saída das placas evaporativas (°C);

t_{bue} : Temperatura de bulbo úmido do ar na entrada das placas evaporativas (°C).

Quando o ar passa através de um sistema de resfriamento evaporativo direto ideal, as temperaturas finais de bulbo seco, bulbo úmido e de ponto de orvalho do ar tendem-se a igualar. A Figura 4 ilustra esse comportamento.

Figura 4: Comportamento das temperaturas do ar para um resfriamento evaporativo direto ideal.



Fonte: Do autor (2020)

2.2 Ambiente térmico para a criação de frangos de corte

Dentre todos os fatores físicos ambientais, a temperatura do ar é o que mais afeta as aves, por comprometer a manutenção da sua homeotermia. Desta forma, para expressar seu máximo potencial de produção, estes animais necessitam de um ambiente térmico adequado (KLEIN, 2016).

Os animais atingem sua produtividade ótima quando são mantidos em ambiente termoneutro, ou seja, quando a energia do alimento não é desviada para compensar desvios térmicos em relação ao intervalo de termoneutralidade para eliminar ou manter seu calor (CURI, 2014).

Segundo Oliveira Neto et al. (2000), a condição de homeotermia das aves se mantém quando o calor gerado pelos processos metabólicos e o recebido do ambiente se dissipam do corpo para o meio. Em ambientes termoneutros, estas trocas são realizadas com um gasto mínimo de energia. Contudo, devido a ausência de glândulas sudoríparas, quando submetidas a altas temperaturas, as aves apresentam grande dificuldade em manter sua temperatura corporal. Soma-se a esta característica, a camada isolante da cobertura de penas que dificulta ainda mais a troca de calor com o meio.

Para Furlan et al. (2001), o ambiente onde o animal se encontra, pode influenciar seu desempenho. Segundo Marchini et al. (2007), apesar de muitos estudos sobre os efeitos do estresse por calor sobre a fisiologia das aves serem realizados sob temperaturas ambientes elevadas constantes, as condições naturais reais não expressam estas condições, pois é registrada uma grande variação de temperatura no decorrer do dia, o que leva a necessidade de climatização apenas em algumas horas do ciclo diário. Informações provenientes das estações meteorológicas do INMET (2019), indicam que a temperatura ambiente na região de Lavras, no último ano, entre 21 de maio de 2018 e 21 de maio de 2019, variou entre 4,5°C a 34°C.

Para cada fase de criação de frangos de corte, por alguns autores subdivididas em semanas, as aves necessitam de certas temperaturas do ar consideradas como adequadas. Pode-se observar na tabela 1 as faixas de temperatura do ar ideais para o conforto térmico ao longo de cada semana na produção de frangos de corte de acordo com vários autores. Contudo, a evolução genética, manejo, densidade de alojamento, adaptação e aclimatização podem influenciar nestas temperaturas (CASSUCE, 2013).

Tabela 1: Temperatura de conforto térmico para frangos de corte em diferentes idades.

Semanas (idade)	Faixa de temperatura do ar (°C)
Primeira	32 – 35
Segunda	29 – 32
Terceira	26 – 29
Quarta	23 – 26
Quinta	20 – 23
Sexta	19 – 20
Sétima	18 – 20

Fonte: Adaptado de ROSS (2014); VANTRESS (2012); ABREU e ABREU (2011).

Portanto, o ambiente é considerado confortável quando a produção de calor decorrente do metabolismo pode ser perdida para o meio sem qualquer estresse (ABREU e ABREU, 2011).

2.3 Impactos dos extremos climáticos na produção avícola

Para se adaptar ao estresse térmico, os frangos de corte alteram o seu comportamento e os seus parâmetros fisiológicos, logo, o excesso de frio ou de calor detém grande influência na manutenção da temperatura corporal do animal (SCHIASSI et al., 2015). Soma-se a esta dificuldade de adaptação, situações em que tanto o excesso quanto a carência de umidade, em ambientes com temperaturas do ar muito elevadas são prejudiciais (MELO, 2016).

Segundo Santos (2014), um relatório de um comitê de agricultores da união europeia, citou, que no ano de 2003, o setor da agricultura de alguns países da Europa sofreu um grande impacto negativo gerado pelas altas temperaturas do ar daquele ano. Na Espanha, o plantel de aves foi reduzido entre 15% a 20% e na França foi registrada a morte de quase quatro milhões de frangos.

Em um futuro próximo, os dados projetados para a elevação da temperatura do ar são preocupantes, principalmente para o setor agrícola. Segundo Machado Filho et al. (2016), projeta-se o aumento da temperatura global na ordem de 1,5 °C até o final do século XXI. De acordo com os mesmos autores, estudos realizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), indicam que para a região norte e nordeste do país, estima-se o aquecimento

de 0,5 a 2,0°C entre os anos de 2016 a 2035. Ademais, as regiões do interior do país serão mais afetadas com este aumento das temperaturas do ar, em comparação com as zonas costeiras.

Consideráveis perdas produtivas são observadas quando os limites das variáveis ambientais extrapolam os limites de conforto térmico dos animais. Como os frangos de corte são homeotérmicos, os limites nos quais estes mantêm sua temperatura corporal são estreitos, o que se agrava a cada dia mais com as mudanças climáticas (BARACHO et al., 2013; BOIAGO et al., 2013; CASTRO, 2014; LOURENÇONI, 2017).

Na tabela 2 são listados os limites inferiores e superiores desejáveis para os valores dos índices de temperatura e umidade (ITU) e de temperatura do globo negro e umidade (ITGU) e da propriedade termodinâmica do ar Entalpia (H) para frangos de corte adultos.

Tabela 2: Limites de índices ambientais e de propriedade termodinâmica para criação de frangos de corte adultos.

Índices de conforto térmico	Limite inferior	Limite superior	Autores
ITU*	56,6	60	ABREU; ABREU, 2001
ITGU	65	77	TEIXEIRA, 1983
H**	37,4	52,1	RODRIGUES et al., 2011

ITU: Índice de temperatura e umidade, ITGU: Índice de temperatura do globo negro e umidade, e H: entalpia.

*Índices indicados para sexta e sétima semana de criação e UR entre 60% e 70%.

** Índices indicados para a sexta semana de criação e UR entre 42% e 80%.

Fonte: Adaptado de Abreu e Abreu (2001), Teixeira (1983) e Rodrigues et al. (2011).

2.4 Desafios térmicos e sua avaliação

Para Santos (2014), a tentativa de quantificar o ambiente térmico animal é objetivo de muitos pesquisadores desde o início do século XX. Para tanto, são utilizadas correlações empregando variáveis como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e radiação solar. Estes pesquisadores também, em alguns casos, consideram outras variáveis como a taxa metabólica e tipo de isolamento. Para relacionar a produção animal com o ambiente e justificar o desempenho dos animais aliando-os às variáveis climáticas, Houghten e Yaglon

(1923) propuseram um estudo, usando humanos para comparar sensações térmicas instantâneas em diferentes ambientes, no qual o Índice de Temperatura Efetiva (ITE) foi baseado na temperatura, umidade e velocidade do ar.

O estresse térmico é um dos principais fatores que limitam o desenvolvimento do animal, principalmente nas regiões de clima tropical (GREGORY, 2010). Este estresse a que os animais estão submetidos, pode ser caracterizado por meio de duas ou mais variáveis meteorológicas, e são expressos em uma única variável conhecida como índice de conforto térmico (FABRICIO, 1994).

Segundo Alecrim (2012), dentre alguns índices de conforto térmico estudados por diversos autores, o índice de temperatura e umidade (ITU), desenvolvido por THOM (1958), é considerado o mais simples, pois depende apenas de duas variáveis, a t_{bs} e a UR. Embora vários autores já tenham demonstrado que este índice, por considerar apenas duas variáveis, apresenta limitação em representar de forma mais ampla as condições ambientais de animais, ele ainda é um dos mais utilizados em trabalhos sobre conforto térmico para animais.

Outro índice utilizado por diversos pesquisadores é o índice de temperatura do globo negro e umidade (ITGU). Este índice é composto pela temperatura ambiental, pela umidade relativa, velocidade do ar e radiação, variáveis essas que afetam diretamente os animais (SARTOR et al., 2000). O ITGU foi proposto por Buffington et al. (1981) com base no ITU, no qual os autores propuseram a substituição da t_{bs} pela temperatura de globo negro (t_{gn}).

Nos casos em que na mesma temperatura ocorrer alteração na umidade relativa, a energia envolvida nesse processo se altera e, como consequência, as trocas térmicas no ambiente serão alteradas (BARBOSA FILHO, 2004). Desta forma, a energia do ar úmido por unidade de massa de ar seco ($\text{kJ kg}_{\text{de ar seco}}^{-1}$) é uma variável física que indica a quantidade de energia contida em uma mistura de vapor d'água, conhecida como Entalpia (H) (PEREIRA, 2007).

Segundo Alvarenga et al. (2014), a umidade relativa pode ser definida como a relação entre a quantidade de vapor d'água existente numa amostra de ar úmido e a quantidade máxima que este ar úmido poderia reter a determinada temperatura. A evaporação ocorre quando as moléculas de um líquido vencem a força de atração entre si e escapam de uma lâmina d'água passando à forma de vapor. Neste instante o ar está saturado de vapor d'água. Ainda para Alvarenga et al. (2014), para cada temperatura do ar, este equilíbrio ocorre a uma determinada pressão de vapor, denominada pressão de saturação de vapor ou pressão máxima de vapor. A

diferença entre a pressão exercida pela quantidade de vapor d'água existente no ar e a pressão máxima que pode ser alcançada, é denominada de déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV). Essa diferença é uma medida do poder evaporante do ar, tendo relação direta com os processos de evaporação, uma vez que depende do gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar (VIEIRA e PICULLI, 2009). Sempre que a UR aumenta, para uma mesma temperatura, reduz-se o déficit de pressão de vapor, mas também a capacidade do ar em absorver umidade (CARVALHO et al., 2009).

A eliminação do calor corporal para o ambiente, em climas quentes, é um dos principais problemas para a criação de animais domésticos em países tropicais (HAHN e OSBURN, 1970; MEDEIROS, 2001). Contudo, esse fator não está relacionado somente às altas temperaturas do ar, mas também à associação dessas com a elevada umidade relativa e baixa movimentação do ar (SCHIASSI, 2013).

Por esse e outros motivos ligados a saúde animal, a renovação do ar e ventilação em galpões para criação de frangos de corte são de suma importância.

2.5 Sistemas de renovação de ar e ventilação

A renovação do ar em um ambiente pode ser classificada como ventilação natural ou espontânea (que pode ser subdividida em ventilação dinâmica e ventilação térmica), e ventilação artificial, mecânica ou forçada (que pode ser subdividida em pressão positiva e pressão negativa). A ventilação artificial por pressão positiva também é conhecida por pressurização, assim como a por pressão negativa é conhecida por exaustão (ABREU e ABREU, 2000).

De acordo com Bustamante et al. (2013), a produção de frangos de corte em aviários modernos, geralmente utiliza de sistemas de ventilação. Essa ventilação mecânica requer uma quantidade de energia elétrica e um alto nível de investimento em tecnologia. No entanto, a produção de frangos de corte é afetada por problemas periódicos de mortalidade por causa do estresse térmico, sendo, portanto, crucial para explorar a efetividade da ventilação. Nestas instalações, o potencial máximo de produção das aves é viabilizado por meio do correto dimensionamento e montagem dos sistemas de ventilação e resfriamento (CURI et al., 2014).

2.6 Influência da ventilação na melhoria do conforto térmico para frangos de corte

As aves quando submetidas a estresse térmico, perdem ou adquirem o calor do meio, sendo que este fenômeno altera o consumo de ração e, em consequência, ocorre o comprometimento do desempenho dessas aves. É importante ressaltar que as aves em situação de estresse por calor apresentam comportamento atípico, que deve ser conhecido pelo meio produtivo e funciona como indutor de ações no sentido de minimizar ou mitigar os efeitos que promovem o desconforto (CARVALHO et al., 2013). Para uma instalação avícola ser considerada adequada em termos de conforto térmico para as aves, esta deve apresentar renovação de ar com a finalidade de remover o excesso de umidade e calor produzido no interior da instalação (SILVA, 2016). Entretanto, para Oliveira et al. (2019), para garantir o bem-estar e o aumento do desempenho das aves, é fundamental a correta caracterização ambiental no qual os animais estão expostos. É ideal que sejam feitos testes com animais, condicionando-os em diversas variações ambientais, como: temperatura, umidade relativa do ar, concentração de gases, velocidade do vento, quantidade e período de exposição à luz benéfica aos animais, com a finalidade de se aproximar o máximo possível do conforto térmico com a manutenção da homeotermia.

Na Tabela 3 encontram-se listadas as necessidades de ar em função da temperatura ambiente e da idade de frangos de corte.

Tabela 3: Necessidades de ar ($L\text{ ave}^{-1}\text{ min}^{-1}$) em função da temperatura ambiente ($^{\circ}C$) e da idade de frangos de corte (semanas).

Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)	Fluxo de ar ($L\text{ ave}^{-1}\text{ min}^{-1}$) em função da Idade de frangos de corte (semanas)			
	1	3	5	7
	4,4	6,8	19,8	34,0
10,0	8,5	22,7	45,3	65,1
15,6	10,2	28,3	53,8	79,3
21,1	11,9	34,0	62,3	93,4
26,7	13,6	36,8	70,8	104,8
32,2	15,3	42,5	79,3	118,9
37,8	17,0	48,1	87,8	133,1
43,3	18,7	51,0	96,3	144,4

Fonte: Bampi (1994), citado por Abreu e Abreu (2000).

Por sua vez, na Tabela 4 são listadas as necessidades de ventilação máxima (utilizada no verão) e mínima (utilizada no inverno), de acordo com a época do ano, a idade e massa corporal dos frangos de corte.

Tabela 4: Necessidades de ventilação, em m^3 de ar/hora/peso corporal de frangos de corte

Idade (dias)	Massa corporal (g)	Exigência de ventilação ($m^3\text{ h}^{-1}\text{ kg}^{-1}$)		
		Inverno (mínima)	Verão (máxima)	Máxima verão Umidade >50%
7	160	0,5	2	2
14	380	0,6	2	2
21	700	0,7	3	3
28	1070	0,9	4	4
35	1500	1,0	5	6
42	1920	1,5	6	8
49	2350	1,5	6	8

Fonte: Lacambra (1997), citado por Abreu e Abreu (2000).

Segundo Vantress (2012), as relações de velocidade máxima do ar no nível dos frangos de corte para cada idade de criação, dividido em quatro intervalos de idade, encontram-se listadas Tabela 5.

Tabela 5: Velocidades máximas do ar no nível dos frangos de corte em função dos meses (em dias de vida).

Idade das aves (dias)	Velocidade (m s⁻¹)
0 a 14	0,3
15 a 21	0,5
22 a 28	0,875
28 ou mais	1,75 a 3,0

Fonte: Vantress (2012)

2.7 Climatização das instalações para frangos de corte

Devido a grande importância para o bom desenvolvimento das aves, a temperatura e a qualidade do ar sempre devem ser monitoradas (RONCHI, 2004). Para a climatização nos aviários de frangos de corte, são utilizados exaustores, ventiladores, painel evaporativo instalados nas entradas de ar, nebulizadores e aquecedores, sendo estes últimos somente utilizados na fase inicial de criação do frango de corte ou no período de inverno (SILVA, 2016).

Em aviários comerciais, os exaustores são dimensionados para possibilitar a renovação de ar do aviário a cada minuto e à velocidade de 2 a 2,5 m s⁻¹. A efetividade desse processo depende de uma boa vedação do aviário, evitando perdas de ar (Giroto e Ávila, 2003).

Segundo Abreu e Abreu (2000), a ventilação artificial é produzida por equipamentos especiais como exaustores e ventiladores. Desta forma, existem duas maneiras de se promover artificialmente a movimentação do ar: por um sistema de pressão negativa ou exaustão, ou por um sistema de pressão positiva ou pressurização. Nos dois casos é de suma importância o conhecimento do volume de ar a ser movimentado. É comum se encontrar em um aviário algumas zonas de pressão de baixa movimentação de ar, seja por pressão negativa ou positiva. Um dos fatores mais frequentes para essa ocorrência é o mau dimensionamento e posicionamento dos equipamentos de ventilação.

Silva (2016) define que o adequado dimensionamento do equipamento de exaustão está relacionado com as vazões necessárias a cada ambiente climático, a velocidade e a pressão de ar desejada para um determinado microambiente. Também, o correto dimensionamento do número de ventiladores a ser utilizado no aviário, irá depender de sua vazão, do volume do aviário, da época do ano e idade das aves.

2.8 Uso de modelos físicos em escala reduzida na avicultura

Os modelos físicos em escala reduzida, utilizados para determinar a efetividade térmica em instalações zootécnicas, possibilitam estabelecer relações com o modelo de escala natural e reduz o custo da pesquisa, possibilitando assim, os estudos na área (JENTZSCH et al., 2013).

Os modelos físicos em escala reduzida e os originais são semelhantes entre si desde que suas grandezas básicas do sistema de medida se comportem de maneira similar (JENTZSCH, 2002). Essa relação deve atender ao critério da teoria da similitude, que é desenvolvida pela análise dimensional dessas grandezas, com objetivo de analisar o comportamento de um modelo reduzido de estudo e o comportamento do mesmo modelo em escala real, e estabelecer relações entre eles.

Diversos trabalhos foram executados com o objetivo de avaliar diferentes materiais e seu comportamento térmico usando modelos físicos construídos em escala reduzida (CARVALHO, 2013; SANTOS et al., 2005), assim como outros utilizaram escala reduzida e distorcida para que representassem instalações avícolas em escala real (AKAMINE e PASSINI, 2017; CURTO et al., 2007; DA CONCEIÇÃO et al., 2008; PEREIRA et al. 2006).

Jentzsch (2002), em uma pesquisa para prever condições térmicas em protótipos, após estudos em modelos reduzidos nas escalas de 1:4, 1:8 e 1:12 concluiu que é possível prever condições térmicas ambientais em protótipos a partir de modelos reduzidos até doze vezes.

A fim de avaliar o ambiente térmico no interior de modelos físicos de galpões avícolas construídos em escala reduzida, Santos et al. (2005), utilizaram modelos reduzidos em 10 vezes (1:10), em todas as dimensões (altura, largura e comprimento). Da Conceição et al. (2008) com objetivo de comparar o desempenho térmico em diferentes tipos de telhas, utilizaram modelos em escadas reduzidas distorcida (1:2 na vertical e 1:10 na horizontal), a mesma escala utilizada por Curto et al. (2007), para o monitoramento do comportamento de matrizes pesadas usando-se a tecnologia de radiofrequência. Também com objetivo de testar diferentes tipos de cobertura

e suas associações com materiais isolantes e forros, Carvalho (2013), utilizou modelos reduzidos em 5 vezes (1:5).

Segundo Trevisan et al. (2017), é fundamental o desenvolvimento de protótipos, de baixo custo, com ferramentas de fácil aplicabilidade, e com melhores propostas para maior controle das condições ambientais e com menor intervenção no comportamento dos animais. O desenvolvimento de protótipos poderá proporcionar melhor controle das condições climáticas, facilitando atingir a temperatura ideal para cada fase de criação de frangos de corte. (Oliveira, et al. 2019).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As instalações comerciais para criação de animais de produção sofreram significativas mudanças após a revolução industrial, tendo como objetivo principal a alimentação da crescente população mundial. O setor é importante para o Brasil e para o mundo, assim, os investimentos, principalmente em tecnologia se consolidaram, possibilitando à pecuária brasileira ser reconhecida como uma das mais desenvolvidas do mundo.

Estes investimentos englobam toda a cadeia produtiva, desde a genética até o bem-estar animal, passando pela nutrição, manejo, implementação de programas de qualidade e a preservação do meio ambiente. Logo, todas as possíveis estratégias no processo de tomada de decisão na produção, obrigatoriamente incluem o estudo da ambiência, relacionado ao comportamento animal.

Neste cenário, os sistemas de climatização, por pressão negativa, comumente implantados em aviários climatizados são uma das principais alternativas para se obter melhores resultados para a maximização da produtividade. Estes sistemas podem ser equipados com placas de celulose que, atualmente, utilizam a água em temperatura natural para o molhamento das mesmas e posterior sucção do ar resfriado para dentro dos aviários. A redução da temperatura da água de molhamento anteriormente ao seu contato com as placas porosas, poderá ser uma alternativa para fornecer melhores condições térmicas no interior dos aviários, facilitando o manejo das aves e, conseqüentemente, proporcionando melhores índices produtivos.

REFERÊNCIAS

ABREU, P. G.; ABREU, V. M. N. Ventilação na avicultura de corte. Embrapa Suínos e Aves- Documentos (INFOTECA-E), 2000.

ABREU, V. M. N.; ABREU, P. G. Diagnóstico bioclimático para a produção de aves no Oeste paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: UNIOESTE/SBEA, 2001. 1 CD-ROM

ABREU, V. M. N.; ABREU, P. G. Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 256, p. 1-14, 2011.

ALECRIM, P. D. Sistema embarcado em microcontrolador para o controle de climatização de aviários de corte. 2012.

ALVARENGA, C. B. et al. Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, 2014.

AKAMINE, L. A.; PASSINI, R. Índices de conforto térmico para aves em modelos reduzidos com diferentes coberturas. **Revista ESPACIOS**, v. 38, n. 6, 2017.

BARACHO, M. S. et al. Ambiente interno em galpões de frango de corte com cama nova e reutilizada. **Agrarian**, Dourados, v. 6, n. 22, p. 473-478, 2013.

BARBOSA FILHO, J. A. D. **Avaliação do bem-estar de aves poedeiras em diferentes sistemas de produção e condições ambientais, utilizando análise de imagens**. 2004, 123 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

BASTOS, A. I. U. **Avaliação de uso de resfriamento evaporativo indireto em sistemas de climatização de edificações comerciais**. 2011. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Artigos/Art_TCC_002_2011.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2020.

BOIAGO, M. M. et al. Desempenho de frangos de corte, alimentados com dietas contendo diferentes fontes de selênio, zinco e manganês, criados sob condições de estresse térmico. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 65, n. 1, p. 241-247, 2013.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.3, p.711-714, 1981.

BUSTAMANTE, E.; DIEGO, F. J. G.; CALVET, S.; ESTELLÉS, F.; BELTRÁN, P.; HOSPITALER, A.; TORRES, A. G. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm. **Energies**, v. 6, n. 5, p. 2605-2623, 2013.

CAMARGO, J. R. **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar**. 2003. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.

CAMARGO, J. R. Resfriamento evaporativo: poupando a energia e meio ambiente. **Revista ciência exatas**, Taubaté, v. 9, n. 2, p. 69-75, 2004.

CAMARGO, J. R. **Resfriamento evaporativo: Climatização ecológica**. Rio de Janeiro: Editora Moderna, 2009.

CARVALHO, V. F.; YANAGI JÚNIOR, T.; DAMASCENO, F. A.; SILVA, M. P. Zoneamento do potencial de uso de sistemas de resfriamento evaporativo no sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 358-366, 2009.

CARVALHO, G. B. D.; LOPES, J. B.; SANTOS, N. P. D. S.; REIS, N. B. D. N.; CARVALHO, W. F. D.; SILVA, S. F.; SILVA, S. M. D. Behavior of broiler chickens raised under thermal stress fed diets containing different levels of selenium. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.14, n.4, p.785-797, 2013.

CARVALHO, H. G. D. **Materiais de cobertura e suas associações a forros e materiais isolantes no ambiente térmico de protótipos abertos e fechados com vistas a produção de frangos de corte em clima quente**. 2013. 91 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

CASTRO, J. O. **Avaliação e modelagem do desempenho de codornas japonesas em postura submetidas a diferentes ambientes térmicos**. 2014. 71 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

CASSUCE, D. C. et al. Thermal comfort temperature update for broiler chickens up to 21 days of age. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 28-36, 2013.

CURI, T. M. R. C.; VERCELLINO, R. D. A.; MASSARI, J. M.; SOUZA, Z. M.; MOURA, D. J. Geostatistic to evaluate the environmental control in different ventilation systems in broiler houses. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.6, p.1062-1074, 2014.

CURTO, F. P., NÄÄS, I. A., PEREIRA, D. F., & SALGADO, D. D. (2007). Estimativa do padrão de preferência térmica de matrizes pesadas (frango de corte). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n.2, p. 211-216, 2007.

DA CONCEIÇÃO¹, M. N., ALVES¹, S. P., JÚNIOR, A. T., DA SILVA, I. J., PIEDADE, S. M., JÚNIOR, H. S., & TONOLI, G. Desempenho de telhas de escória de alto forno e fibras vegetais em protótipos de galpões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 536-539, 2008.

FABRICIO, J. R. Influência do estresse calórico no rendimento da criação de frango de corte. In: CONFERENCIA APINCO DE CIENCIA E TECNOLOGIA AVICOLA, São Paulo. **Anais...** São Paulo, Apinco, p. 129-133, 1994.

FURLAN, R. L.; CARVALHO, N.C.; MALHEIROS, E. B.; MACARI, M. Efeito da restrição alimentar inicial e da temperatura ambiente sobre o desenvolvimento de vísceras e ganho compensatório em frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 53, n. 4, p. 1-7, 2001.

GIROTTI, A. F.; AVILA, V. S. Produção Frangos de Corte. **Embrapa Suíno e Aves**, 2003.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

GREGORY, N. G. How climatic changes could affect meat quality. **Food Research International**, v. 43, n. 7, p. 1866-1873, 2010.

HAHN, E. S. E.; OSBURN, D. D. Feasibility of evaporative cooling for dairy cattle based on expected production losses. **Transaction of American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 13, n. 3, p. 289-291, 1970.

HELLICKSON, M. A.; WALKER, J. N. **Ventilation of Agricultural Structures**. American Society of Agricultural Engineers, 1983.

HOUGHTEN, F. C.; YAGLOU, C. P. Determining equal comfort lines. **Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 29, p. 165-176, 1923.

INMET, In. Instituto nacional de meteorologia, 2019.

JENTZSCH, R. **Estudo de modelos reduzidos destinados à predição de parâmetros térmicos ambientais em instalações agrícolas**. 2002. 103 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

JENTZSCH, R., BAÊTA, F. C., TINÔCO, I. D. F. F., DAMASCENO, F. A., & OSÓRIO, J. A. Parâmetros arquitetônico-ambientais para construção e testes em modelos reduzidos, representativos de galpões avícolas, com base em similitude. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 19-30, 2013.

KLEIN, D. R. **Comportamento de frangos de corte em diferentes condições térmicas**. 2016. 71 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

LOURENÇONI, D. **Modelagem fuzzy e efeito das mudanças climáticas nas respostas produtivas de frangos de corte criados em diferentes sistemas comerciais de produção**. 2017. 119 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

MACHADO FILHO, H.; MORAES, C.; BENNATI, P.; RODRIGUES, R. A.; GUILLES, M.; ROCHA, P.; LIMA, A.; VASCONCELOS, I. Mudança do clima e os impactos na agricultura familiar no Norte e Nordeste do Brasil. **Embrapa Solos-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2016.

MARCHINI, C. F. P.; SILVA, P. L.; NASCIMENTO, M. R. B. M.; TAVARES, M. Frequência respiratória e temperatura cloacal em frangos de corte submetidos à temperatura ambiente cíclica elevada. **Archives of Veterinary Science**, v. 12, n. 1, 2007.

MEDEIROS, C. M. **Ajustes de modelos e determinação de índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte**. 2001. 125 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

MELO, L. S. S. **Parâmetros físicos e fisiológicos relacionados com a tolerância ao calor em ovinos no Brasil**. 2016. 126 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

NASCIMENTO, G. R. **Refrigeração evaporativa de telhados por meio de gotejamento de água. Experimento em bancada de testes**. 2005. 83 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2005.

OLIVEIRA NETO, A. R.; OLIVEIRA, R. F. M.; DONZELE, J. L.; ROSTAGNO, H. S.; FERREIRA, R. A.; MAXIMIANO, H. C.; GASPARINO, E. Efeito da Temperatura Ambiente sobre o Desempenho e Características de Carcaça de Frangos de Corte Alimentados com Dieta Controlada e Dois Níveis de Energia Metabolizável. **Rev. bras. zootec**, v. 29, n. 1, p. 183-190, 2000.

OLIVEIRA, G. S.; SANTOS, V. M.; RODRIGUES, J. C.; NASCIMENTO, S. T. Protótipo para o estudo do comportamento e da zona de conforto térmico de frangos de corte. **REVISTA EIXO**, v. 8, n. 1, 2019.

PEREIRA, C. L. **Avaliação do conforto térmico e do desempenho de frangos de corte confinados em galpão avícola com diferentes tipos de coberturas**. 2007. 103 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Pirassununga, SP, 2007.

PEREIRA, D. F.; CURTO, F. P. F.; DE ALENCAR NÄÄS, I. Diferenças nos comportamentos individuais quanto à preferência de uso de locais de matrizes pesadas em função do ambiente térmico. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 43, n. 6, p. 775-782, 2006.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural–Porto Alegre**: DC Luzzato Editores: Ed. **Da Universidade, UFRGS**, 1985.

RODRIGUES, V. C.; SILVA, I. J. O.; VIEIRA, F. M. C.; NASCIMENTO, S. T. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v.55, n.3, p.455-459, 2011.

RONCHI, C. Principais práticas de manejo para aves recém nascidas. **Revista Aveworld. Editora Animal Word**. Ano 1, n. 6, p. 26-30, 2004.

ROSS. **Broiler management handbook**, 2014.

SANTOS, P. A. D., YANAGI JUNIOR, T., TEIXEIRA, V. H., & FERREIRA, L. U. Ambiente térmico no interior de modelos de galpões avícolas em escala reduzida com ventilação natural e artificial dos telhados. **Engenharia Agrícola**. v. 25., n. 3, p.575-584, 2005.

SANTOS, J. P. A. **Estimação das perdas produtivas em frangos de corte devido ao estresse por calor**. 2014. 43 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

SARTOR, V.; BAÊTA, F. C.; TINÔCO, I. F. F. Efeito de modificações ambientais de verão nos índices de conforto térmico, em maternidades de suínos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 29., 2000, Fortaleza/CE. **Anais...** Fortaleza: SBEA, 2000. (Em CD-ROM).

SCHIASSI, L. **Desempenho e comportamento de frangos de corte em túneis de vento climatizados**. 2013. 77 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2013.

SCHIASSI, L., YANAGI, J. T., FERRAZ, P. F., CAMPOS, A. T., SILVA, G. R., & ABREU, L. H. P. Comportamento de frangos de corte submetidos a diferentes ambientes térmicos. **Engenharia Agrícola**. v.35. n.3 p.390-396, 2015.

SILVA, W. T. **Sistema automatizado para avaliação de exaustores em galpões climatizados**. 2016. 133 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2016.

TEIXEIRA, V. H. **Estudo dos índices de conforto em duas instalações de frango de corte para as regiões de Viçosa e Visconde do Rio Branco, MG**. 1983. 62 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 1983.

THOM, E. C. Cooling degree-days air conditioning, heating and ventilating. **Transactions of the ASAE**, Atlanta, v. 55, n. 7, p. 65-72, 1958.

TRANE, **Trane Air Conditioning Manual**. The Trane Company, La Crosse, Wisconsin, 1978. 456 p.

TREVISAN, L. Y. I.; KRUGER, E. L.; FERNANDES, L. C.; TAMURA, C. A. Proposta de construção de câmara climática móvel de baixo custo para estudos de ambiência térmica no Brasil. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 14, 2017, Balneário Camboriú, 27-29 set. 2017, p. 652-661.

VANTRESS, Cobb. Cobb broiler management guide. **Cobb-Vantress, Siloam Springs, AR, USA**, 2012.

VIEIRA, L.; PICULLI, F. J. Meteorologia e climatologia agrícola. **Cidade Gaúcha-Pr: Universidade Estadual de Maringá**, 2009.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

ARTIGO 1 -

EFEITO DO PRÉ-RESFRIAMENTO DA ÁGUA APLICADA EM PLACAS POROSAS DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Normas da Revista Científica: Ciência Rural

ISSN: 1678-4596

(Versão preliminar)

RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho, avaliar o efeito do pré-resfriamento da água que promove o molhamento das placas porosas sobre o ambiente térmico. O experimento foi realizado em dois modelos físicos construídos em escala reduzida e distorcida que simularam instalações agrícolas fechadas, equipadas com sistema de resfriamento evaporativo composto de painéis porosos de celulose. Em um modelo físico, o molhamento das placas foi realizado por meio de água resfriada (SRAR) e o outro por meio de água natural à temperatura ambiente (SRAN). Mensurou-se a temperatura de bulbo seco do ar (t_{bs}), temperatura de globo negro (t_{gn}) e umidade relativa do ar (UR) no interior dos modelos físicos e no ambiente externo em intervalos de 10 s. Posteriormente, foram calculados índices ambientais e a efetividade de resfriamento de cada placa porosa umedecida. O resfriamento da água usada no molhamento de placas porosas de sistemas de resfriamento evaporativo propiciou maior redução nas variáveis térmicas e índices de conforto em relação ao molhamento com água à temperatura

ambiente, sendo proposta uma equação empírica para a estimativa da efetividade de resfriamento em função da temperatura da água e do déficit de pressão de vapor.

Palavras-chave: Ambiência, sistema de resfriamento evaporativo, placas porosas umedecidas.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the pre-chilled water effect that promotes the wetting of porous plates on thermal environment. The experiment was carried out on two physical models built on a small and distorted scale that simulated closed agricultural facilities, equipped with evaporative cooling system composed of porous cellulose panels. In one physical model, the plates were wetted using chilled water (CWCS) and the other using natural water at room temperature (NWCS). It was measured the air dry-bulb temperature (t_{db}), the black-globe temperature (t_{bg}) and the air relative humidity (RH) inside of the physical models and the external environment at 10 seconds interval. Thereafter, environmental indexes and the cooling effectiveness of each wetting porous plate were calculated. The water cooling used in the wetting porous plates of the evaporative cooling systems provided a greater reduction in thermal variables and comfort indexes compared to wetting with water at room temperature, and an empirical equation has been proposed to estimate the cooling effectiveness as a function of the water temperature and the vapor pressure deficit.

Keywords: Ambience, evaporative cooling system, wetting porous plates.

INTRODUÇÃO

A dificuldade do controle do ambiente térmico no interior de instalações agropecuárias tem demandado diversas pesquisas na área de ambiência. Esse controle ainda é oneroso para os criadores, principalmente em regiões de clima quente, com registros de altas temperaturas do ar em longos períodos do ano ou em certos períodos do dia, como é o caso do Brasil. Contudo, para se obter resultados positivos no setor agropecuário, tal controle é de suma importância para que, durante todo o ciclo de produção, os animais possam ser criados sempre em sua zona de conforto térmico, o que resultará em melhores índices produtivos. Para tanto, o setor vem passando gradualmente de sistemas de criação abertos, ditos convencionais, com uso de controle artificial de temperatura apenas quando necessário, para sistemas fechados por cortinas ou alvenaria, que somados aos processos de climatização, são efetivos em reduzir a temperatura interna dos ambientes de criação animal.

Uma das mais eficazes e economicamente viáveis soluções para se reduzir as temperaturas internas em aviários fechados, tem sido o uso de processos evaporativos, seja por nebulização ou por meio de placas porosas umedecidas. Estas últimas, possuem maior capacidade de resfriamento do ar em comparação à nebulização, sendo que, a sua efetividade de resfriamento pode ser variada em função do uso de diferentes materiais em sua composição. Esta efetividade será gradativamente maior com a elevação da temperatura do ar ambiente no exterior das instalações e a redução da umidade relativa do ar. Em substituição a essas placas de celulose, na perspectiva de se obter melhores desempenhos ou menores custos, o uso de argila expandida e fibras vegetais como material poroso de placas são exemplos de alternativas. Entretanto, estudos avaliando a temperatura da água de molhamento das placas porosas para se obter melhores índices térmicos não foram encontrados na literatura atual para criação de animais de produção em sistemas fechados.

Diante deste contexto, objetivou-se com o presente trabalho, avaliar um sistema de climatização com pré-resfriamento da água usada para o molhamento dos painéis de resfriamento evaporativo instalados em um modelo construído em escala reduzida distorcida que representa um sistema fechado para criação de animais de produção.

MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste experimento, foram construídos dois modelos físicos em escala reduzida distorcida que foram locados em uma área no município de Lavras - MG, com as seguintes coordenadas geográficas: 21°13'45.28''S de latitude; 44°58'32.85''O de longitude e 918 m de altitude. O clima do local é Cwa, segundo a classificação climática de Köppen, sendo temperado chuvoso (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso, subtropical, e temperatura do mês mais quente maior que 22 °C (DANTAS et al., 2007).

3.1 Construção dos modelos físicos de aviários

Os modelos físicos, com características construtivas idênticas, representam instalações agropecuárias fechadas para produção animal. As escalas adotadas para a construção dos modelos foram de 1:10 na largura, 1:25 no comprimento e 1:2 na altura, obtendo assim dimensões internas de 1,5 m de largura, 6 m de comprimento e altura de 1,5 m. Os modelos físicos tiveram as cumeeiras orientadas no sentido Leste-Oeste verdadeiro.

No primeiro modelo físico, a placa porosa foi molhada com água previamente resfriada, denominado de sistema de resfriamento da placa com água resfriada (SRAR). Por sua vez, no segundo modelo físico, utilizou-se água à temperatura ambiente, em condições naturais, sendo denominado de sistema de resfriamento da placa de celulose com água natural (SRAN).

Os dois modelos físicos foram avaliados comparativamente em relação às suas condições de microclima interno e, principalmente, quanto a efetividade de um sistema de

prévio resfriamento da água aplicada nos painéis de resfriamento evaporativo. A figura 1 ilustra o projeto de construção dos modelos, em perspectiva, planta baixa e corte.

3.2 Construção e montagem do sistema de resfriamento da água reutilizada em painéis evaporativos

Um sistema de climatização composto por placa porosa, comumente utilizado no setor agropecuário, como em aviários comerciais, foi instalado em cada modelo físico. Para o dimensionamento de sistemas de ventilação do tipo túnel de vento com pressão negativa, associado ao sistema de resfriamento evaporativo, adotou-se os procedimentos de cálculo proposto pelo manual de manejo de frango de corte (VANTRESS, 2018).

Em uma das extremidades de cada modelo físico foram instalados três exaustores de 0,40 m de diâmetro com rotação aproximada de 1600 rpm e vazão de $4200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ cada, enquanto que, na extremidade oposta aos exaustores, foi instalada uma placa de celulose com área de $1,00 \text{ m}^2$.

O sistema de resfriamento da água presente no SRAR é composto por uma unidade condensadora (embraco, modelo UNEU6214E). A temperatura da água foi reduzida por um sistema de resfriamento que consta de um compressor hermético, um condensador de ar, uma caixa térmica (550 x 500 x 280 mm) com 77 litros e uma bomba com potência de 1/2 CV (foxlux, vazão de 2400 L h^{-1} , potência 370 watts, altura manométrica máxima de 30 mca). Por meio desta bomba elétrica, a água foi elevada até a parte superior da placa de celulose. Foi adotada uma vazão de $0,17 \text{ L s}^{-1} \pm 0,0043 \text{ L s}^{-1}$ para SRAR, e de $0,17 \text{ L s}^{-1} \pm 0,0029 \text{ L s}^{-1}$ para SRAN.

3.3 Metodologias para a experimentação nos modelos físicos em escala reduzida

Para a análise térmica do ambiente no interior dos modelos físicos construídos em escala reduzida, os sensores foram instalados no interior das instalações, a 30 cm da placa, em cinco posições distintas (figura 1), sendo registradas as seguintes variáveis ambientais: temperatura de bulbo seco (t_{bs} , °C), umidade relativa (UR, %), temperatura de globo negro (t_{gn} , °C) e velocidade do ar (V_{ar} , $m\ s^{-1}$). Mensurou-se também, as temperaturas da água previamente resfriada e da água natural.

Para o registro da t_{bs} , t_{gn} e UR do ar, foram utilizados termo-higrômetro (Onset, modelo U12-013), com acurácia de $\pm 0,35\ ^\circ C$ (0° a $50\ ^\circ C$) para temperatura e $\pm 2,5\%$ (10% a 90%) de umidade relativa, faixa de medição entre -20 a $70^\circ C$ de temperatura e 5% a 95% de umidade relativa. Acoplados aos canais externos destes mesmos sensores, registrou-se a temperatura da água de molhamentos das placas de celulose ($t_{\acute{a}gua\ r.}$ e $t_{\acute{a}gua\ n.}$). Estes sensores ficaram submersos no interior dos reservatórios de água resfriada (SRAR) e de água natural (SRAN).

Um anemômetro de fio quente (Higmed, modelo HM385) foi utilizado para registrar V_{ar} , com acurácia de $\pm 5\% + 0,1\ m\ s^{-1}$, em nove posições distintas dentro de cada modelo, sempre no início de cada dia de experimento. Para aquisição da t_{gn} em cada modelo físico em escala reduzida, utilizou-se sensor de temperatura posicionado no centro de um globo negro, com 3,6 cm de diâmetro (Santos et al., 2005), e pintado externamente com tinta preta fosca. O sensor de globo negro foi instalado apenas na região central de cada placa de celulose. Externamente aos modelos, em um único local, foram coletadas a t_{gn} (posicionados no centro de um globo negro, também com 3,6 cm de diâmetro, e pintado externamente com tinta preta fosca), a t_{bs} e UR. Para a avaliação térmica no interior dos modelos reduzidos equipados com sistema de resfriamento evaporativo, foram calculados a partir das variáveis meteorológicas registradas e t_{gn} , o índice de temperatura e umidade (ITU) proposto por Thom (1958), equação 1 (tabela 1);

o índice de temperatura de globo e umidade (ITGU) (Buffington et al., 1981), equação 2 (tabela 1); a entalpia específica (h) proposta por Albright (1990) e adaptada por Rodrigues et al. (2011), equação 3 (tabela 1); a efetividade (ϵ) (Riangvilaikul e Kumar, 2010), equação 4 (tabela 1) e; o déficit de pressão de vapor (DPV), equações 5 e 6 (tabela 1).

Segundo Camargo (2008), para um resfriador evaporativo direto, a efetividade ou eficiência de saturação, é definida como a taxa entre a queda real da t_{bs} e a máxima queda teórica que a t_{bs} poderia ter se o resfriador fosse 100% eficiente e o ar saísse saturado.

A temperatura de bulbo úmido do ar (t_{bu}) foi calculada por meio analítico pelas equações que definem as propriedades psicrométricas do ar (WILHELM, 1976).

3.4 Instrumentação e medições

Para o controle do resfriamento da água foi instalado um termostato digital *full gauge* modelo TIC-17RGTi, resolução de 0,1 °C (entre -10 e 100 °C) e 1°C no restante da faixa.

O monitoramento da temperatura superficial dos painéis de celulose umedecidos, foram realizados manualmente em intervalos de 1 minuto por meio de uma câmera termográfica infravermelho FLUKE (acurácia de 0,05 °C).

Para verificar a existência de equivalência entre os dois sistemas de resfriamento evaporativo instalados nos modelos físicos construídos em escala reduzida, foi realizado um experimento prévio, durante três dias não consecutivos, no qual todas as condições para o funcionamento do sistema foram similares. Esta etapa foi denominada de “fase de pré-teste”.

Posteriormente, as avaliações dos sistemas (SRAR e SRAN) foram realizadas em nove dias não consecutivos, no período mais quente do dia (das 12:00 às 15:45), denominado de “fase de teste”. Os valores de $t_{\text{água}}$ ao longo dos testes variaram de 8,8 a 16,1 °C para o SRAR e de 18,3 a 21,5 °C para o SRAN. Para cada dia, analisou-se três ciclos de funcionamento dos

sistemas de resfriamento evaporativo, com e sem resfriamento da água de molhamento das placas. A duração de cada ciclo de resfriamento foi de 15 minutos, tempo este em que a água foi bombeada para a superfície das placas evaporativas de celulose. Este intervalo de tempo foi definido em vista da incapacidade do sistema de resfriamento em manter a água resfriada por longos períodos. Após este período de resfriamento, os sistemas foram desligados por 45 minutos, anteriores ao próximo bombeamento, visando o resfriamento da água do SRAR.

Dos 15 minutos de coleta de dados, apenas os dados mensurados nos 5 minutos intermediários foram usados nas análises estatísticas. Este procedimento permitiu maior estabilização do sistema de resfriamento evaporativo, pois no início a placa de resfriamento evaporativo estava sendo umedecida e, nos 5 minutos finais, a temperatura superficial da placa tendia a aumentar devido à própria incapacidade do sistema de resfriamento de água em manter a $t_{\text{água}}$ constante. Todos os dados foram registrados em intervalos de 10 s.

3.5 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado (DIC) com um único fator representado pela temperatura da água, subdividida em dois níveis (Sistema de resfriamento com água em temperatura natural – SRAN e Sistema de resfriamento com água em temperatura resfriada – SRAR), aplicado nos modelos em escala reduzida. As variáveis respostas, relacionadas ao conforto térmico nessas duas situações, foram mensuradas totalizando 27 repetições para cada uma.

A análise dessas variáveis entre os dois níveis do fator foi realizada por meio do teste t de Student para dados independentes com nível de significância de 5%. Modelos de regressão linear múltipla para estimar a efetividade de resfriamento das placas em função da temperatura da água e do déficit de pressão de vapor (DPV) foi ajustada.

Todas as análises estatísticas foram realizadas pelo sistema computacional estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da fase de pré-teste (tabela 2), indicam que todas as variáveis analisadas são estatisticamente iguais ($p > 0,05$, teste T). Esse resultado indica que existe equivalência entre os sistemas de resfriamento evaporativo instalados nos dois modelos construídos em escala reduzida, permitindo assim, a comparação das respostas do sistema de resfriamento evaporativo com pré-resfriamento da água em relação ao sistema resfriado com água à temperatura ambiente.

Na tabela 2 também são listados os resultados para a comparação das respostas térmicas e de efetividade de resfriamento evaporativo observados nos modelos físicos equipados com sistemas de resfriamento do tipo placa porosa umedecida, na fase denominada de teste. Verificou-se que as variáveis t_{bs} , t_{po} , ε e $t_{\text{água}}$, e os índices ITU, ITGU e a propriedade termodinâmica h , apresentaram médias com diferença significativa ao nível de 1% pelo teste t, e a variável t_{gn} apresentou média com diferença significativa ao nível de 5%. O modelo SRAR apresentou melhores médias para todas as variáveis e índices, exceto para UR e t_{sp} , que não foram observadas diferenças significativas entre os modelos ($P > 0,05$, teste T).

Durante os nove dias de experimento a UR média externa foi de 40,9 % e a t_{bs} média externa foi de 31,2 °C. Segundo Vantress (2018), para condição aproximadamente semelhante a esta, um sistema composto por placa evaporativa de celulose deverá ser capaz de reduzir a temperatura interna dos aviários em 7,4 °C, acrescentando 33,1 % de UR. De acordo com a tabela 2, o SRAN reduziu a temperatura em 6,8 °C (7% menor ao indicado) com um acréscimo

de UR de 29,1 % (12% menor ao indicado). O SRAR reduziu a temperatura em 8,1 °C (9,4 % superior ao indicado), com acréscimo de 28,3 % de UR (14% menor ao indicado).

Tinôco et al. (2002), comparando a efetividade de resfriamento de alguns materiais porosos alternativos encontrados no Brasil, observaram que a maior desigualdade relacionada a diferença entre ITGU, interno e externo a estufas, foi de aproximadamente 2,5 a favor da cinasita (argila expandida) em comparação aos seguintes materiais testados: serragem, fibra vegetal e carvão. Estes valores estão próximos a diferença entre as placas umedecidas com água resfriada e água natural, chegando a 2,1 a favor da água resfriada. Isto indica que, além da possibilidade de se alterar os materiais que compõem as placas porosas, poder-se-á fazer o pré-resfriamento da água de molhamento das placas.

Rosa et al. (2011), comparando a efetividade de resfriamento da cinasita com painéis de celulose, obsevou valores médios de efetividade para a celulose de 78,1%. Neste experimento, foram obtidos valores de efetividade de 72,5 % para SRAN e 87,1% para SRAR, sendo as velocidades médias do ar de 0,74 m s⁻¹ e 0,73 m s⁻¹, respectivamente. O SRAR foi 20,14% mais efetivo que o SRAN, e, 11,5% mais efetivo que os observados por Rosa et al. (2011).

Ao se estudar diversas correlações múltiplas entre as variáveis, a correlação de melhor ajuste encontrada para estimativa dos valores de efetividade de resfriamento evaporativo foi em função da $t_{\text{água}}$ e do DPV (Figura 2), obtendo-se R² de 0,66 e com todas as variáveis com 99,99% de significância.

CONCLUSÕES

Para a condição específica deste estudo, o pré-resfriamento da água usada no molhamento de placas porosas de sistemas de resfriamento evaporativo propiciou maior

redução nas variáveis térmicas e melhores resultados de índices de conforto em relação ao molhamento com água à temperatura ambiente.

Uma equação empírica para a estimativa da efetividade de resfriamento em função do déficit de pressão de vapor e temperatura da água de molhamento da placa porosa foi proposta.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Não temos nenhum conflito de interesse a declarar.

REFERÊNCIAS

ALBRIGHT, L. D. Environment control for animals and plants. ASAE Textbook, 4. American Society of Agricultural Engineers Michigan, St. Joseph, 1990.

DANTAS, A. A. A. et al. Climatic classification and tendencies in Lavras region, MG. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.6, p.1862-1866, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>>. Acesso em: 10, Out., 2019. doi: 10.1590/S1413-70542007000600039.

BUFFINGTON, D.E. et al. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 3, p. 711-714, 1981. Disponível em:<<https://www.tandfonline.com/servlet/linkout?suffix=CIT0005&dbid=16&doi=10.1080%2F09291016.2018.1526499&key=10.13031%2F2013.34325>>. Acesso em: 17, Out., 2019. doi: 10.13031/2013.34325.

CAMARGO, J. R. Evaporative cooling: water for thermal comfort. **Ambiente e Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 3, n. 2, p. 51-61, 2008. Disponível em: <<http://ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/118>>. Acesso em: 16, Out., 2019. doi: 10.4136/1980-993X.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.034>>. Acesso em: 10, Out., 2019. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.10.034.

RODRIGUES, V.C. et al. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v. 55, n.3, p.455-459, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00484-010-0344-y>>. Acesso em: 03, Mai., 2019. doi: 10.1007/s00484-010-0344-y.

ROSA, J. F. et al. Análise da eficiência de resfriamento de painéis porosos preenchidos com argila expandida em comparação aos de celulose usando túnel de vento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 6, p. 516-523, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/96/80>. Acesso em: 28, Dez., 2019. doi: <https://doi.org/10.13083/reveng.v19i6.107>.

SANTOS, P. A. D. et al. Ambiente térmico no interior de modelos de galpões avícolas em escala reduzida com ventilação natural e artificial dos telhados. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 575-584, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162005000300002>>. Acesso em: 15, Jun., 2019. doi: 10.1590/S0100-69162005000300002.

THOM, E. C. Cooling degree-days air conditioning, heating and ventilating. Transactions of the ASAE, Atlanta, v. 55, n. 7, p. 65-72, 1958.

TINÔCO, I. F. F. et al. Avaliação de materiais alternativos utilizados na confecção de placas porosas para sistemas de resfriamento adiabático evaporativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 147-150, 2002. doi: Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000100026>>. Acesso em: 15, out., 2019. doi: 10.1590/S1415-43662002000100026.

VANTRESS, Cobb. Cobb broiler management guide. **Cobb-Vantress, Siloam Springs, AR, USA**, 2018.

WILHELM, L. Numerical calculation of psychrometric in SI units. **Transactions of the ASAE**, v. 19, n. 2, p. 318-321, 325, 1976. Disponível em: < <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=36019>>. Acesso em: 14, jan., 2020. doi: 10.13031/2013.36019.

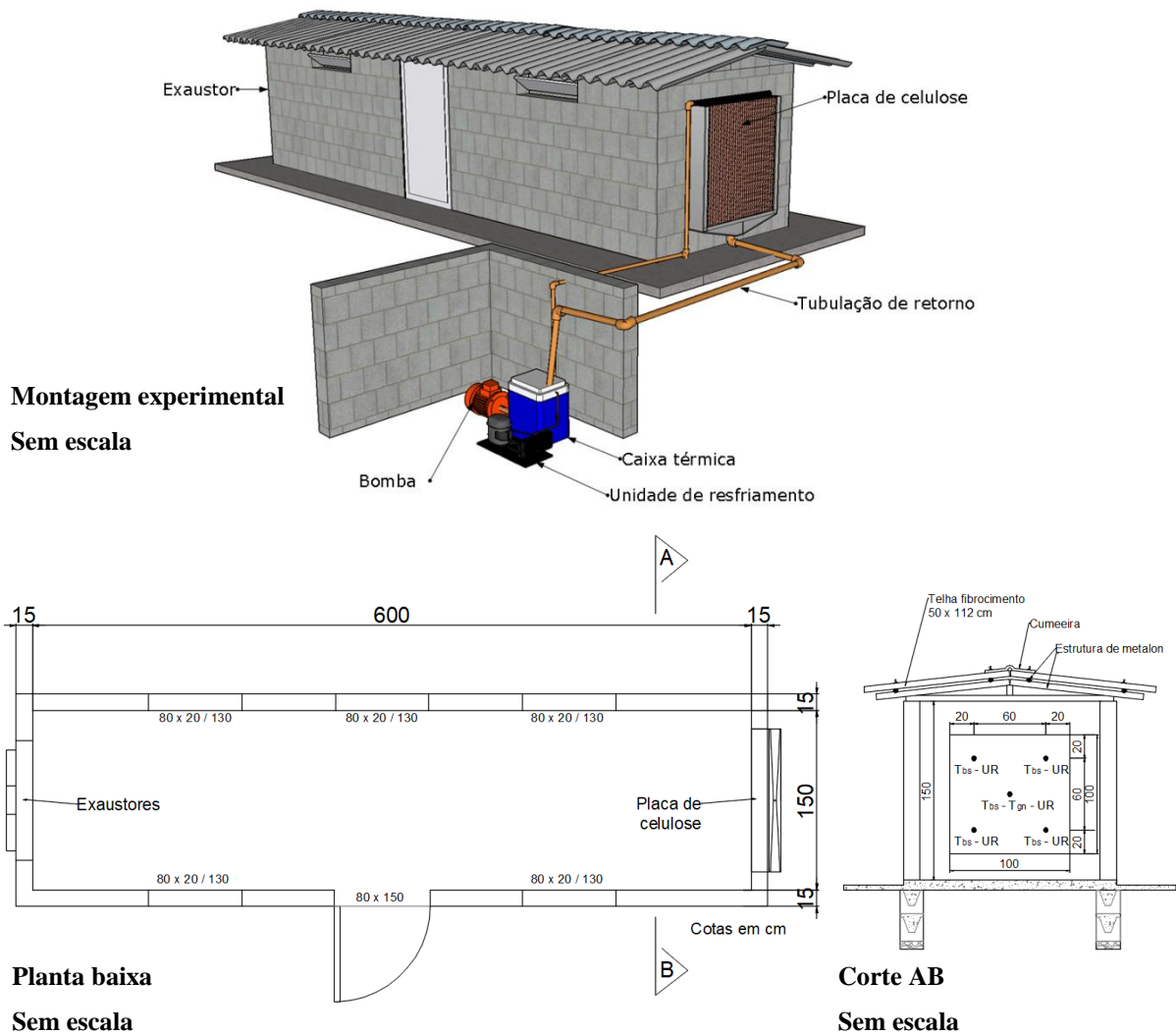


Figura 1: Montagem experimental em perspectiva, Planta Baixa e Corte AB do modelo físico de aviários com sistema de resfriamento da placa de celulose com água natural (SRAN) e água resfriada (SRAR). Os pontos no Corte AB indicam as posições de medição das temperaturas de bulbo seco do ar e globo negro (t_{bs} e t_{gn}) e umidade relativa do ar (UR). Detalhamento sem escala.

Tabela 1 – Equações usadas para o cálculo dos índices de avaliação do ambiente térmico, propriedade termodinâmica do ar e efetividade de resfriamento evaporativo do ar.

Nº	Equação	Legenda
1	$ITU = t_{bs} + 0,36 \cdot t_{po} + 41,5$	ITU: Índice de temperatura e umidade; t_{bs} : temperatura de bulbo seco (°C); t_{po} : temperatura do ponto de orvalho (°C).
2	$ITGU = t_{gn} + 0,36 \cdot t_{po} + 41,5$	ITGU: índice de temperatura de globo negro e umidade; t_{gn} : temperatura de globo negro (°C); t_{po} : temperatura do ponto de orvalho (°C).
3	$h = 1,006 \cdot t + \frac{UR}{P_B} \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot t}{237,3 + t}\right)} \cdot (71,28 + 0,052 \cdot t)$	h: entalpia específica do ar ($\text{kJ kg}_{\text{ar}}^{-1}$); t : temperatura de bulbo seco (°C); UR: umidade relativa do ar (%); P_B : pressão barométrica local (mmHg).
4	$\varepsilon = \frac{t_{bse} - t_{bss}}{t_{bse} - t_{bue}}$	ε : Efetividade de resfriamento evaporativo; t_{bse} : temperatura de bulbo seco na entrada das placas evaporativas (°C); t_{bss} : temperatura de bulbo seco na saída das placas evaporativas (°C); t_{bue} : temperatura de bulbo úmido na entrada das placas evaporativas (°C).
5	$DPV = \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \cdot P_{ws}$	DPV: déficit de pressão de vapor; UR: Umidade relativa do ar (unidade); P_{ws} : pressão de saturação do ar proposta por Tetens para temperaturas de bulbo seco superiores a 0° C (equação 6);
6	$P_{ws} = 6,1078 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot t_{bs}}{237,3 + t_{bs}}\right)}$	P_{ws} : pressão de saturação do ar (mbar); t_{bs} : temperatura de bulbo seco (°C);

Tabela 2 – Teste t de Student aplicado para comparação das respostas térmicas e de efetividade de resfriamento dos modelos em escala reduzida equipados com sistemas de resfriamento evaporativo do tipo placa porosa umedecida, nas fases de pré-teste e teste.

FASE	VARIÁVEIS	MÉDIAS		DESVIO PADRÃO		P(T<=t) uni-caudal
	E ÍNDICES	SRAN.	SRAR.	SRAN.	SRAR.	
Pré-teste	Δt_{bs}	-7,1	-6,7	1,039	0,962	0,2127
	ΔUR	31,3	29,6	3,336	3,504	0,1505
	ΔITU	-6,2	-6,0	0,641	0,579	0,2699
	$\Delta ITGU$	-10,0	-10,4	2,538	2,489	0,3760
	Δh	-3,5	-3,1	0,678	0,709	0,1362
	Δt_{gn}	-11,0	-11,1	2,658	2,597	0,4445
	Δt_{po}	2,6	2,0	1,177	1,113	0,1532
	ε	79,7	75,5	7,321	7,039	0,1113
	t_{sp}	28,1	27,8	3,803	3,788	0,4369
	$t_{\acute{a}gua}$	17,7	17,4	0,681	0,873	0,1994
Teste	Δt_{bs}^{**}	-6,8	-8,1	0,886	1,077	$2,8586 \cdot 10^{-6}$
	ΔUR	29,1	28,3	2,541	2,904	0,1231
	ΔITU^{**}	-5,8	-7,9	0,803	1,077	$6,0195 \cdot 10^{-11}$
	$\Delta ITGU^{**}$	-9,3	-11,5	2,513	2,536	0,0014
	Δh^{**}	-3,0	-7,0	1,457	1,781	$3,9887 \cdot 10^{-12}$
	Δt_{gn}^{*}	-10,3	-11,7	2,539	2,547	0,0241
	Δt_{po}^{**}	2,7	0,6	1,292	1,183	$4,9292 \cdot 10^{-8}$
	ε^{**}	72,5	87,1	8,385	11,841	$1,8845 \cdot 10^{-6}$
	t_{sp}	30,1	29,5	3,637	3,713	0,2517
	$t_{\acute{a}gua}^{**}$	19,4	12,9	0,775	1,860	$1,0742 \cdot 10^{-18}$

Δt_{bs} : Diferença entre a temperatura de bulbo seco do ar interna e externa (°C), ΔUR : Diferença entre a umidade relativa do ar interna e externa (%), ΔITU : Diferença entre o índice de temperatura e umidade interno e externo, $\Delta ITGU$: Diferença entre o índice de temperatura de globo e umidade interno e externo, Δh : Diferença entre a entalpia interna e externa ($\text{kJ kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$), Δt_{gn} : Diferença entre a temperatura de globo negro interna e externa (°C), Δt_{po} : Diferença entre a temperatura de ponto de orvalho interna e externa (°C), ε : Efetividade de resfriamento evaporativo (%), t_{sp} : Temperatura superficial na face externa da placa porosa umedecida (°C), $t_{\acute{a}gua}$: Temperatura da água (°C). Níveis de significância pelo teste de t de Student: * (P<0,05) ** (P<0,01)

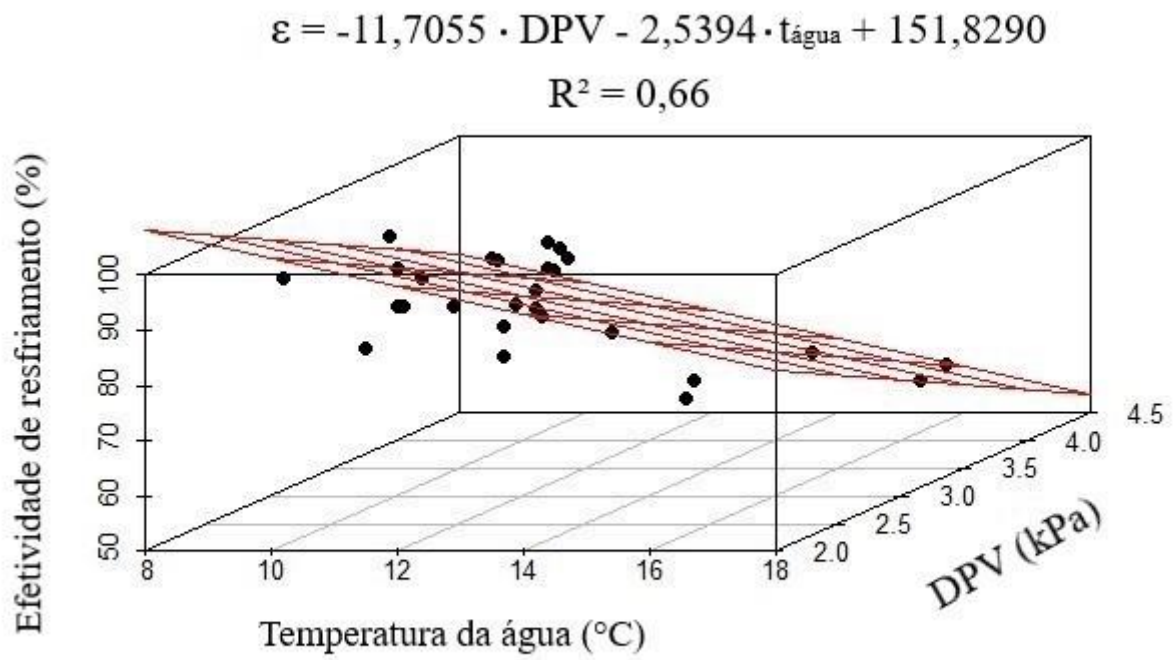


Figura 2: Comportamento da efetividade de resfriamento do ar em função da temperatura da água usada para o molhamento da placa porosa ($t_{\text{água}}$) e do déficit de pressão de vapor (DPV).