

DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE AR MAIS HOMOGÊNEO, COMPARATIVO A DOIS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO FORÇADA POR VENTILADORES, APLICADOS EM GALPÕES DE CONFINAMENTO DE VACAS LEITEIRAS EM SISTEMAS DE CAMAS DE COMPOSTAGEM (COMPOST BARN).

Bolívar Peres Fagundes - bolivar_fagundes@terra.com.br

Faculdade Profissional – FAPRO, www.fapro.com.br

Me. Alexandre Fernandes Santos – paidakantsy@hotmail.com

Faculdade Profissional – FAPRO, www.fapro.com.br

Esp. Heraldo José Lopes de Souza – heraldosouza1@gmail.com

Faculdade Profissional – FAPRO, www.fapro.com.br

03 – FONTES ENERGÉTICAS

RESUMO. Na busca pela alta produtividade de leite, muitas técnicas vêm sendo desenvolvidas por profissionais da área, dentre as quais, destaca-se o "Compost bedded dairy barn system", comumente chamado de Compost Barn (Celeiro de Compostagem), criado por produtores norte-americanos, na década de 80, mas, somente em 2001, começou a ser aplicado em maior escala por produtores de leite de outros países, dentre eles, o Brasil. O sistema consiste na construção de galpões abertos nas laterais, tendo, no piso rebaixado, o acúmulo de serragem de madeira ou outro vegetal seco disponível. As vacas circulam livremente no interior desses galpões, expelindo fezes e urina constantemente sobre a serragem, formando uma massa com atividade bacteriológica que gera aquecimento e emissão de gases. A ventilação nesses galpões tem a função de desumidificar, diluir gases e resfriar a cama, melhorando as condições de conforto térmico dos animais confinados. Os sistemas de ventilação forçada analisados são por ventiladores de teto, com tecnologia high volum low speed (HVLS) e ventiladores LVHS (Low Volum High Speed). Com a análise de ambos os sistemas em computational fluid dynamic (CFD), conclui-se que o sistema com a utilização de ventiladores HVLS produz um fluxo de ar mais homogêneo e com menor consumo elétrico.

Palavras-chave: Celeiro de compostagem, Ventilação de vacas em lactação, Ventilação de galpões de compostagem.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de ventilação proporcionam a circulação e a renovação do ar nos ambientes, sendo fundamentais para o conforto térmico e higiene, especialmente, nas edificações em climas quentes, úmidos e temperados. Um nível adequado de renovação de ar nos ambientes é fundamental para dissipação de calor, desconcentração de vapores, gases, pó e demais poluentes contidos no ar interno. Além da diluição de gás carbônico, a ventilação deve atender à desconcentração de gases que causam odores, evitando o desconforto na inalação. O critério fundamental para a ventilação de ambientes deve contemplar os requisitos básicos exigidos pelos seres vivos ocupantes do ambiente, sendo que este estudo tem como foco os galpões de *Compost Barns* (celeiros de compostagem), para vacas em lactação.

2. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A ventilação é um processo físico, por meio natural ou mecânico, cuja finalidade é promover a circulação e/ou exaustão do ar em um recinto. Existem alguns tipos de ventilações:

2.1 Ventilação natural

Em ambientes fechados, a ventilação natural pode ser obtida por diferencial de pressão, possível de ser provocado por aberturas nas paredes e no telhado. Essas pressões são exercidas na edificação por ação dos ventos externos e distribuída em função do seu sentido e velocidade. Os diferenciais de pressão geram um fluxo de ventilação que pode ser quantificado pela seguinte Eq. 1 (Nãas, 1989).

$$Q_v = k \cdot A_o \cdot v \cdot (C_e - C_s) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

Onde:

Q_v = fluxo de ar pela ação dos ventos (m^3/h); K = coeficiente de perda de carga por ação dos ventos (0,6); A_o = área livre das aberturas (m^2); V = velocidade do vento externo na abertura (m/s); C_e = coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar; C_s = coeficiente de pressão da abertura de saída de ar.

Considere que o A_o resulta da função das áreas de entrada e saída de ar, conforme a Eq. 2;

$$\frac{1}{A_o^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2} \quad (2)$$

Onde:

A_e = área de entrada do ar externo (m^2); A_s = área de saída de ar (m^2).

2.2 Ventilação por efeito chaminé

O incremento de calor no interior de uma edificação provoca a elevação da temperatura do ar interno. Com o aquecimento, o ar que fica menos denso, ou mais leve, estratifica-se na parte superior do ambiente. Havendo aberturas inferiores e superiores, o ar aquecido tenderá a sair pelas aberturas superiores, enquanto o ar externo, com temperatura mais baixa, tende a penetrar no ambiente pelas aberturas inferiores. Convém observar que a vazão do ar circulante nesse sistema atinge maior nível quanto maior for a distância entre a entrada e a saída de ar.

Para o cálculo da ventilação por efeito chaminé consideram-se os diferenciais de pressões e temperaturas internas e externas da edificação. A vazão de ar, para calcular o número de trocas necessárias ao tipo de ambiente, pode ser obtida na norma técnica segundo a ABNT-NBR 16401 – 3: 2008.

A vazão de ar desejada, via sistemas por efeito chaminé, pode ser calculada pela Eq. 3, (Nããs, 1989):

$$V_{ch} = 0,128 \cdot A \cdot h (t_i - t_e) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

Sendo:

V_{ch} = vazão de ar; 0,128 = massa específica do ar a 60°F – 10 psi (Silveira, F. L – 2012); A = área de abertura, segundo seja esta ou aquela a menor (m^2); h = altura média entre aberturas de entrada e saída de ar; t_i = temperatura interna média na altura h ($^{\circ}\text{C}$); t_e = temperatura do ar externo, à sombra ($^{\circ}\text{C}$).

2.1 Ventilação forçada

A ventilação em ambientes fechados pode resultar em aumento ou diminuição de calor, dependendo da carga térmica dissipada por máquinas, ocupação e pela temperatura externa. O fluxo de calor no ambiente é proporcional ao calor específico do ar, à taxa de renovação, ao volume do ar interno e ao diferencial de temperatura interna e externa.

Nesse sistema, o calor trocado pela ventilação será calculado pela Eq. 4 (Nããs, 1989):

$$Q = 0,26 \cdot N \cdot V \cdot \Delta t \quad (\text{W}) \quad (4)$$

Onde:

Q = carga térmica de ventilação (W); 0,26 = calor específico do Ar a pressão constante ($\text{W}/\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) (Nããs, 1989 pg. 152); N = número de trocas de ar/hora; Δt = diferencial de temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$).

3 CLIMA E TERMORREGULAÇÃO

Os sistemas de ventilação em edificações demonstrados até aqui são amplamente utilizados em espaços com paredes laterais, sendo que diversos equipamentos e soluções estão disponíveis para potencializar os efeitos. No tocante a galpões para abrigo de animais, o desafio é estudar a adequada ventilação desses espaços, resultando na melhor combinação entre oxigenação, diluição dos gases, desumidificação da cama e, conseqüente melhoria no conforto térmico do animal. Nos galpões com sistema de *compost barn*, por serem abertos e somente com telhado, as propriedades físicas do ar atmosférico no interior do galpão variam conforme a região, a estação do ano e estão submetidas às oscilações constantes de temperatura, umidade, radiação solar, índice pluviométrico, sentido e velocidade dos ventos. Isto dificulta em muito a leitura dos dados de umidade e temperaturas. Por tais motivos, o estudo da psicrometria do ar interno é praticamente inviável.

A obtenção de um controle de temperatura e umidade em galpões com sistema de *compost barn* é dificultada em função das variáveis citadas, porém, uma adequada construção e uma movimentação de ar homogênea e com vazão de ar adequada, podem gerar resultados bastante satisfatórios.

4 BALANÇO TÉRMICO EM AMBIENTES ABERTOS

O meio ambiente térmico não pode ser descrito, somente, considerando as temperaturas de bulbo seco e úmido. Num país de clima tropical, é fundamental incluir o calor radiante seja na soma final das fontes de calor que compõem o balanço térmico. Especialmente nos galpões com sistema *compost barn*, além do calor latente dissipado pelas vacas, deve-se também incluir o calor radiante do telhado e o calor gerado pela atividade bacteriológica em atividade na cama de compostagem. A mensuração das trocas térmicas radiantes não é exatamente simples. As constantes variações nas cargas tornam quase impossível desenvolver uma formulação em um modelo matemático. Outra importante fonte de calor em galpões abertos é o telhado. A transmissão de calor radiante pelo telhado, ao interior do galpão, está diretamente relacionada ao isolamento das telhas e à cor da superfície voltada para o exterior. Se o telhado tiver isolamento térmico, ou for de cor branca, reduzirá, consideravelmente, a transmissão de calor por irradiação para o interior do galpão.

4.1 Fontes de calor em galpão de compostagem

Na Fig. 1, demonstra-se as fontes de calor incidentes no galpão de compostagem.

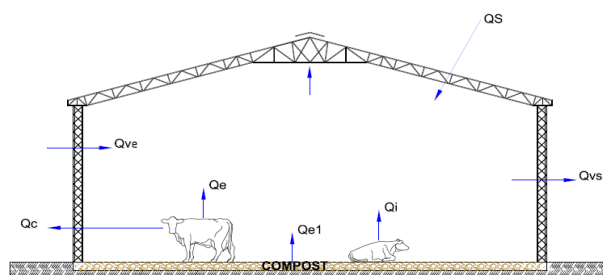


Figura 1 - Corte vertical em galpão de compostagem -

Onde:

Qc – Calor trocado por condução; Qe – Calor de evaporação do animal; Qi – Calor dissipado pelo animal; Qe1 – Calor radiante da cama de compostagem (piso); Qs – Calor de irradiação solar do telhado; Qve – Calor da ventilação de entrada; Qvs – Calor de ventilação de saída.

4.2 Coleta de dados psicrométricos em campo

As variações climáticas, assim como as variações de psicrometria no interior dos galpões de compostagem, estão exemplificadas nas Tab. 1 e 2. Os dados foram coletados nos estados de São Paulo e Minas Gerais, por serem as regiões de maior produção de leite e de clima mais quente.

DATA	HORA	TBSE (°C)	TBUE (°C)	UR (%)	UA (kg/kg)	TBSI (°C)	TBUI (°C)	UR (%)	UA (kg/kg)	TEMP. CAMA (superf)	TEMP. CAMA (interna 0,30 cm)	TEMP. TETO (zinco)	VELOC. DO AR (m/s a 0,3 m)
26/set	11:45	32,1	23,7	49,81	0,0149	27,5	21,8	65,33	0,0152	21,1	33,8	34,4	1,8 - 2,4
	12:20	31,4	23,5	51,77	0,0149	26,7	21,2	61,6	0,0135	22,2	32,6	26,6	1,8 - 2,4
	@ 13:45	27,8	22,3	62,44	0,0146	28,8	23,7	65,59	0,0163	23,5 / 31,0	32,0 / 40,0	32,2	1,8 - 2,4
	15:30	28,1	22,2	60,24	0,0143	27,9	22,1	60,69	0,0143	21,1	32,0 / 41,0	27,5	1,8 - 2,5
	@ 15:40	28,6	22,2	57,68	0,0141	28,2	22,4	60,92	0,0146	22,5 / 32,0	33	30,4	1,8 - 2,6
27/set	07:00	22,4	20,3	82,85	0,014	21,5	19,8	85,71	0,0137	19,3	34,4	22,2	1,8 - 2,7
	@ 08:00	23	21,2	85,42	0,015	23,6	23,6	74,36	0,0135	20,6 / 32,0	35,7 / 42,0	28,6	1,8 - 2,8
	11:00	30	24,8	65,77	0,0176	28,2	22	58,5	0,014	22,3	33,2	33	1,8 - 2,9

Tabela 1 - Tabela da coleta de dados em galpão de compost barn na Fazenda Santo Antônio, em Piracicaba/SP (2015). Medições realizadas pelo autor com psicrômetro digital infravermelho, com data logger

Observação - ® - medições realizadas durante o revolvimento do composto pelo trator.

DATA	HORA	TBSE (°C)	TBUE (°C)	UR (%)	UA (kg/kg)	TBSI (°C)	TBUI (°C)	UR (%)	UA (kg/kg)	TEMP. DA CAMA (superf.)	TEMP. DA CAMA (int 0,30 cm)	TEMP. TETO (zinco)	VEL (m/s a 0,3 m)
27/out	07:00	22,3	22	97,46	0,0165	23,3	21,5	85,52	0,0153	24,7	39	23,5	0
	07:06	22,3	22	97,46	0,0165	23	23	100	0,0177	22,3	35	23,1	2,2
	07:45	23,6	21,4	82,55	0,0151	23,1	21,1	83,9	0,0149	24,1	37	24,2	0
	08:05	23,2	20,1	75,6	0,0134	23,1	21,1	83,9	0,0149	22	37	23,8	1,8 *
	08:20	23,2	21	81,67	0,0146	24,2	22,1	83,53	0,0158	41	47	25,7	1,8 *
	09:25	26,1	22,3	72,28	0,0153	25,7	20,6	63,37	0,0131	26,8	33	27,3	0
	09:45	27,8	23,5	69,97	0,0164	26	22	70,87	0,0149	22,6	33,9	30,2	1,8
	12:30	30	23,7	59,36	0,0158	30,4	24	59,1	0,0161	30	39	33,8	0
	13:00	31,2	24	55,31	0,0158	31,1	23,5	52,21	0,015	31	40	36	2,2
	14:00	33,7	25	49,7	0,0163	32,8	25	53,45	0,0167	31	37	38,5	0
	14:20	33	24,3	49,1	0,0155	31,3	23,8	53,79	0,0154	28,4	38,4	34,4	2,2
	14:20	33	24,3	49,1	0,0155	31,3	23,8	53,79	0,0154	28,4	38,4	34,4	2,2
28/out	08:00	23,3	21,4	84,74	0,0152	22,3	21,1	90,01	0,0152	21,5	41	21,7	2,2
	09:30	23,1	21,7	88,6	0,0157	22,8	22,1	94,18	0,0164	23,6	40	22	2,2

Tabela 2 - Tabela da coleta de dados em galpão de compost barn na Fazenda Barreiro Alto, em Três Lagoas/MG (2015). Medições realizadas pelo autor com psicrômetro digital infravermelho, com data logger

Observação- * - medições realizados com os ventiladores a 80% da rotação normal.

O equipamento utilizado para as medições foi o psicrômetro ref. TI - 400, marca Instruherm. O referido equipamento mede temperatura de bulbo seco e úmido, umidade relativa e ponto de orvalho.

4.3 Incidência de calor pelo telhado

A Eq. 5 e Eq. 6 são utilizadas para o cálculo do calor transmitido para dentro do galpão, advindo da carga de calor solar pelo telhado (FROTA, 1984).

$$Q_s = Q_{op} \cdot \Delta t \quad (W) \quad (5)$$

Onde:

$$Q_{op} = \frac{\alpha k}{h\theta} \cdot I_g + k \cdot \Delta t \quad (W/m^2) \quad (6)$$

Onde:

Q_s = Quantidade de calor solar (W); Q_{op} = Quantidade de calor radiante (W/m^2); α = Coeficiente de absorção da radiação solar; k = Coeficiente global de transmissão térmica ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); h = Coeficiente de condução superficial externa ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); I_g = Intensidade de irradiação solar global (W/m^2); Δt = Gradiente de temperatura ($^\circ C$); A_t = Área do telhado em plano (m^2).

4.4. Transferência de Calor na Cama de Compostagem

Como sabido, a transferência de calor entre uma superfície e um fluido só acontece se houver diferença de temperaturas entre ambos, assim como a transferência de massa também depende do diferencial dos índices de umidades. Para uma eficiente transferência de calor e massa, a velocidade do fluxo de ar na superfície da cama é fator determinante para que o processo se realize.

A Fig. 2 demonstra como se dá a transferência de calor de uma superfície com um fluido em movimento;



Figura 2 - Diagrama de transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento.

Fonte: CASTRO, 2006 (p. 3).

4.5 Coeficiente de transmissão de calor na cama de compostagem

Dentre as fontes de calor demonstradas acima, destaca-se o Coeficiente de transmissão de calor da cama de compostagem (Q_{e1}). Por meio de medições em alguns galpões de compostagem, nos estados de São Paulo e Minas Gerais, obteve-se dados de temperaturas e umidade, cujas variáveis, dificultam a determinação precisa desse índice.

Entendeu-se que a fórmula de Newton, Eq. 7, seja a mais adequada para determinar o coeficiente de transmissão de calor (h) da cama de compostagem em um dado momento, sendo que este coeficiente altera constantemente em função ΔT , como pode-se observar nas tabelas de tomada de temperaturas e umidade levantadas em campo pelo autor, na Tab. 1.

Outro detalhe importante a observar é que a atividade bacteriológica no interior da cama gera calor constante, o que também dificulta a determinação precisa de ΔQ ;

$$h = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta T \cdot \Delta t} \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ K) \quad (7)$$

Onde:

h = coeficiente de transferência térmica; ΔQ = entrada de calor ou perda de calor (J); A = área de superfície de transferência térmica (m^2); ΔT = diferença de temperatura entre a área da superfície do sólido e do fluido circundante ($^\circ K$); Δt = período de tempo (s).

4.6 Revolvimento da cama para auxílio à secagem

Nas informações da tabela 3, note-se ®- revolvimento de cama, que ocorre duas vezes ao dia nos horários de ordenha. Na primeira hora da manhã e no final da tarde, o trator equipado com garfos, revolve a cama em toda a superfície com o objetivo de descompactar e aerar a massa composta. Esse procedimento, em conjunto com a ventilação, também, contribui no processo de resfriamento e desumidificação da cama.

4.7 Área de cama por vaca

Na construção de um galpão de compostagem, deve ser observada a área mínima por vaca, visando possibilitar a livre circulação e espaço necessário à ventilação adequada na cama.

A Tab. 3 estabelece os parâmetros para o correto dimensionamento da cama de compostagem.

PASSOS	CÁLCULOS	FÓRMULAS	EXEMPLO	RESULTADOS	
1	Área necessária	AD x NV	10,0 x 100	1.000,00 m ²	
2	Comprimento do celeiro	(CM x NV)/ 12	(7,3 x 100)/12	60,8 m	
3	Largura do celeiro	AN x CC	1000 / 60,8	16,45 m	
4	Largura total do celeiro	LC + LPA	16,45 + 3,60	20,05 m	
5	Área total do celeiro	LTC x CC	20,05 x 60,08	1.219,04 m ²	
AN -	Área necessária (m ²)	CM -	Comprimento da manjedoura/vaca (m)	LPA -	Largura da pista de alimentação (m)
AD -	Área de descanso necessária/vaca (m ²)	CC -	Comprimento do celeiro (m)		
NV -	Número de vacas	LC -	Largura de celeiro (m)	LTC -	Largura total do celeiro (m)

Recomendações - AD = 10,0 m²/vaca, AM = 7,3 m/vaca.

Tabela 3 - Tabela para dimensionamento da cama de compostagem

Fonte: Damasceno, 2012.

4.8 INTERFERÊNCIAS NA SUPERFÍCIE DA CAMA

Constata-se que a população de vacas em um galpão de compostagem, interfere diretamente na distribuição do fluxo de ar da ventilação. Quanto maior for a população de animais por metro quadrado, menor será a eficiência de ventilação e desumidificação da cama.

Outro aspecto de interferência observado diz respeito ao corredor de alimentação, geralmente posicionado na lateral da cama, onde normalmente as vacas são molhadas para que ocorra um resfriamento corporal antes de serem conduzidas à sala de ordenha. Dependendo da corrente de ventos externos, a umidade desse corredor pode ser arrastada para a cama. Na ocorrência de chuvas com vento, o mesmo efeito pode ocorrer. Em alguns galpões visitados pelo autor, observa-se a utilização de lonas de proteção na lateral dividindo o corredor da cama e na lateral aonde as chuvas são mais constantes.

Na Tab. 4, observa-se os efeitos da temperatura e umidade na produção de leite.

TEMPERATURA (°C)	UMIDADE RELATIVA (%)	RAÇA HOLANDESA (%)*	RAÇA JERSEY (%)*	RAÇA PARDA-SUIÇA (%)*
24	38	100	100	100
24	76	96	99	99
34	46	63	68	84
34	80	41	56	71

Tabela 4 - Tabela do efeito da temperatura do ar e da umidade na produção de leite

Fonte: Johnson, Vanjonack, 1976 - apud Titto, 1998.

Observação - * - diferenças na produção de leite baseadas na porcentagem da produção normal de leite à temperatura de 24°C e 38% de umidade relativa.

Na Tab. 5, observa-se a influência da temperatura, umidade e velocidade de vento na produção de leite.

Tbs (°C)	UR (%)	V (m/s)	ΔPL (%)	TR (°C)	FR (resp/min)	IA (kg)	EV (g/h)
20	50	1,7	0,7	38,6	32	45,2	501
	80	1,7	-0,7	38,6	29	43	305
32	50	1,7	-7,1	38,8	40	41,5	761
	80	1,7	-26,1	40,5	106	23,7	428
20	50	5,3	0,7	38,5	23	48	325
	80	5,3	-0,7	38,3	19	47,7	280
32	50	5,3	-1,4	38,7	44	39,3	722
	80	5,3	-15,2	39,6	89	38	371

Tabela 5 - Tabela de valores de variação na produção de leite (ΔPL), temperatura retal (TR), frequência respiratória (FR), ingestão de alimentos (IA) e evaporação (EV), em função da temperatura do ar (TBS), umidade relativa (UR) e velocidade do ar (V).

Fonte: Baêta, 1985.

5 PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Segundo Chiavassa, et al., (2014), o processo de compostagem depende da degradação da matéria orgânica por microorganismos, dando como resultado dióxido de carbono, água em forma de vapor e calor. Nesses galpões, as fezes e urina depositadas pelas vacas, aportam à cama os nutrientes essenciais necessários (carbono, nitrogênio, umidade e microorganismos) para que aconteça o processo de compostagem. É um processo notadamente aeróbico. O monitoramento da

temperatura da cama é necessário para garantir o nível de atividade bacteriológica. A temperatura deve ser medida, numa altura entre 15 e 25 cm abaixo da superfície, e, para ser adequada, deve estar entre 45 e 55°C. Acima de 55°C, pode provocar desconforto térmico para os animais, fazendo eles não deitarem sobre a cama, sendo este um indicador de um acelerado processo de degradação da matéria orgânica.

6 VENTILAÇÃO FORÇADA EM GALPÕES ABERTOS

Quando o objetivo for a ventilação forçada em galpões abertos, dados como quantidade e arranjo dos ventiladores devem ser considerados, levando em conta as características operacionais dos mesmos.

6.1 Ventilação com ventiladores tipo Low Volume High Speed (LVHS): Os ventiladores tipo LVHS possuem diâmetros de até 2,0 m, operam com alta rotação, produzindo ar em alta velocidade, sendo dispostos em linha com leve inclinação para baixo, conforme Foto 1.

6.2 Ventilação com ventiladores tipo High Volume Low Speed (HVLS): Os ventiladores de teto tipo HVLS, possuem diâmetros de até 7,0 m, operam com baixa rotação, produzindo grande vazão de ar em baixa velocidade, e estão dispostos, conforme a Foto 1. Estes ventiladores geram um fluxo de ar vertical, de cima para baixo, distribuindo o ar horizontalmente em todos os sentidos.

7 Tipos de Construção

Diversos tipos de construção puderam ser observadas pelo autor em fazendas no Brasil e Argentina, durante visitas técnicas realizadas entre 2014 e 2016. Encontrou-se galpões com diferentes alturas, com ou sem abertura no telhado (lanternins), com telhas de fibrocimento ou metálicas, estrutura metálica, madeira e concreto pré-moldado. Em galpões com baixo pé direito, é utilizado o sistema com ventiladores tipo LVHS, e em galpões com pé direito maior, o sistema com ventiladores HVLS tem sido usado utilizado com mais frequência.



Foto 1 - Galpões com ventiladores de alta rotação e ventiladores HVLS

8 ANÁLISE DAS HOMOGENEIDADES DOS FLUXOS DE AR

Nas equações apresentadas até aqui, considerou-se, basicamente, valores de vazão de ar induzido pelo calor interno e pelo efeito do vento. São vários fatores que influenciam a temperatura e, conseqüentemente, o ambiente em uma estrutura aberta. Devido às variáveis citadas e às características construtivas dos galpões de compostagem, torna-se inviável o condicionamento do ar interno. Assim, uma adequada ventilação forçada torna-se a solução indicada, sob o ponto de vista técnico e econômico.

O desafio do projeto de ventilação é garantir que toda a área da cama seja ventilada e que os animais recebam uma velocidade de vento mínima necessária ao conforto térmico. O equilíbrio entre esses dois objetivos terá melhor resultado quanto melhor for a homogeneidade do fluxo de ar. Com o objetivo de determinar qual fluxo é mais homogêneo, comparando-se os dois tipos de ventiladores, realizou-se simulações com utilização do software *Computational Fluid Dynamic* (CFD) em galpões de mesmas dimensões. As simulações CFD foram realizadas no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (LMF) da Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, sob a supervisão dos professores Tanit Daniel Vecina e José Leandro Rosales Luz, em março de 2016.

Os softwares utilizados para a criação da geometria foi o *Solid Works* e para a criação da malha foi utilizado o *ANSYS - ICEM v.14*. Para as simulações foi utilizado o *ANSYS - FLUENT v.14*.

9. Análise CFD para determinação de Homogeneidade

Dinâmica dos Fluidos Computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) resolve numericamente as equações diferenciais governantes do escoamento, empregando processamento computacional. Primeiramente, utilizada para predições de escoamentos em duas dimensões, essa técnica permite análises tridimensionais de grandes e pequenas escalas.

A natureza da turbulência impossibilita a solução direta das equações governantes do escoamento, devido ao grande custo computacional exigido, não compatível com o disponível atualmente no mercado (Vecina *et al*, 2015). Dessa forma, o uso de modelos que resolvem todas as escalas de turbulência do escoamento como o DES (*Deattached Eddie Simulation*) e o LES (*Large Eddie Simulation*), apesar da maior precisão nos resultados, cresce lentamente. Sendo assim, a solução é modelar os efeitos da turbulência, o que tem se mostrado bastante eficaz. A maioria dos modelos em CFD empregados no estudo de turbomáquinas como ventiladores, compressores e bombas são baseados nas equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS). Neste contexto, diversos modelos de fechamento foram desenvolvidos. No estudo em questão, foi utilizado o $k\omega - SST$.

Para resolver o escoamento sobre o domínio computacional, o código do software comercial utilizado emprega uma técnica numérica baseada nos volumes de controle da malha (Método dos Volumes Finitos – MVF), aos quais aplica o princípio de conservação de uma determinada grandeza escalar, ou seja, o código resolve as equações governantes do escoamento para cada volume finito (Luz, 2012). As equações discretizadas da variável dependente são obtidas integrando a equação governante sobre cada um dos volumes de controle no domínio. Em resumo, a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é ferramenta que permite uma avaliação numérica fidedigna do comportamento de casos reais. De toda forma, é importante contabilizar corretamente as condições de contorno para aumentar a garantia dos resultados.

Para a análise do escoamento sobre os ventiladores, empregou-se neste trabalho a solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS). Assumindo-se que o escoamento é incompressível, as equações 3.1 e 3.2 governam o escoamento dos fluidos, baseadas no princípio da conservação de massa, Eq. 8 e *momentum*, Eq. 9.

*Conservação de massa:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

Onde:

u_i = componente de velocidade na direção i (m/s); x_i = coordenada na direção i (m).

Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

Onde:

u_i, u_j = componente de velocidade na direção i e j (m/s); t = tempo (s); x_i, x_j = coordenada na direção i e j (m); ρ = massa específica (kg/m³); ν = viscosidade cinemática (m²/s).

Para abranger os efeitos da turbulência, Osbourne Reynolds (1898) decompôs as variáveis dependentes da equação de Navier-Stokes numa soma da média temporal da velocidade com sua flutuação no tempo, conforme Eq. 10.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (10)$$

Onde:

$\bar{u}_i$ = média temporal; u'_i = componente flutuante ($i = 1, 2, 3$).

Assim obteve a RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes), Eq. 11:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (11)$$

Onde:

u_i, u_j = componente de velocidade na direção i e j (m/s); t = tempo (s); x_i, x_j = coordenada na direção i e j (m); ρ = massa específica (kg/m³); ν = viscosidade cinemática (m²/s).

Modelo $k\omega$ – SST

Baseado no conceito de viscosidade turbulenta (μ_t) proposto por Boussinesq, cuja hipótese é de que as tensões de Reynolds são proporcionais à deformação do escoamento médio, agindo como tensões viscosas. No modelo $k-\omega$, a viscosidade turbulenta é modelada por duas equações extras para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Uma para a energia cinética turbulenta k , e outra para a dissipação ω .

9.1 Modelagem numérica

9.1.1 Discretização espacial - Método dos volumes finitos

De maneira geral, a discretização espacial consiste em dividir o domínio de cálculo em milhares ou milhões de pequenos volumes para os quais as equações governantes do escoamento, Navier-Stokes, serão resolvidas iterativamente, até a convergência dos resultados (Luz, 2012). Segundo Carcangiu (2008), o método dos volumes finitos consiste em:

- Divisão do domínio computacional em uma malha composta por volumes de controle discretos;
- Integração das equações governantes sobre cada volume de controle, resultando em equações que contém variáveis discretas como velocidade, pressão, temperatura, etc.
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equações lineares.

Os valores das variáveis são armazenados no centróide dos volumes de controle. Nas faces desses volumes os valores das variáveis discretas são expressos por meio de funções de interpolação (Patankar, 1980; Maliska, 2004).

Entre os esquemas de interpolação destacam-se: O Esquema *Upwind* (barlavento) de Primeira Ordem (*Upwind Differencing Scheme*, UDS) que assume que os valores das variáveis nas faces de um elemento são iguais aos valores armazenados no centro dos mesmos; o Esquema de Diferenças Centrais (*Central Differencing Scheme*, CDS) que utiliza interpolação linear; o *Quadratic Upwind Interpolation* (QUICK, Leonard, 1979) que é baseado na média ponderada de um esquema *Upwind* de segunda ordem e diferenças centrais.

9.1.2 Domínio e geometria computacional

O modelo 3D de um galpão contendo 20 (vinte) ventiladores LVHS e outro contendo 6 (seis) ventiladores HVLS, foi feito em software CAD. O galpão possui 20,0 m x 80,0 m x 5,0 m. A geometria dos ventiladores foi suprimida para esse trabalho (Fig 3).

Os ventiladores foram modelados como cilindros em que o diâmetro respeita o diâmetro dos ventiladores testados (LVHS - 2,0 m; HVLS – 6,784 m). Na figura mostra-se uma imagem do modelo 3D dos galpões.

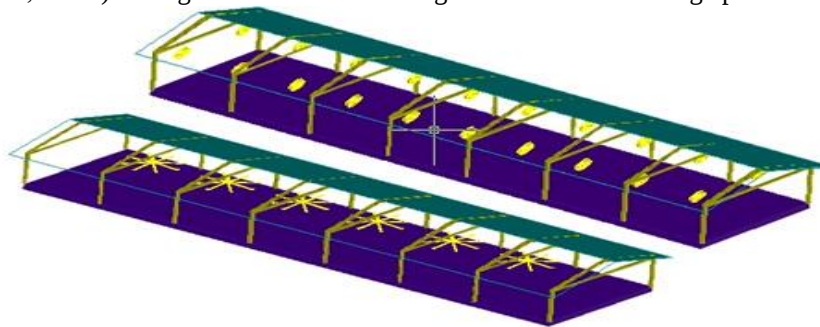


Figura 3 - Geometria do galpão com os domínios do LVHS e HVLS dispostos

Fonte: Solid Works, 2016.

9.1.3 Geração da malha de volumes finitos

Utilizando o modelo em CAD dos galpões, foi feita a discretização da geometria em uma malha de elementos finitos. A malha que, pode ou não ser estruturada, é criada através de ferramentas e métodos disponibilizados pelo programa. Para o presente trabalho, foi criada uma malha de elementos tetraédricos. A imagem da malha de trabalho está apresentada na Fig. 4 abaixo;

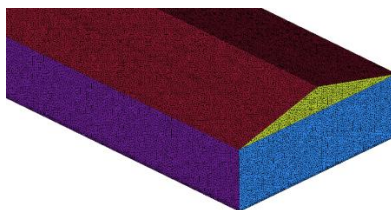


Figura 4 - Visual da malha de trabalho

Fonte: Solid Works, 2016.

9.2 Condições Iniciais e de Contorno do Problema

As malhas geradas são importadas para o *solver* onde são aplicadas as condições iniciais e de contorno. Ao chão e ao telhado, foi aplicada a condição de parede sem deslizamento, ou seja, a velocidade do escoamento junto a essas superfícies será nula. As laterais foram consideradas abertas com pressão manométrica 0 Pa.

A geometria dos ventiladores foi suprimida, devido ao alto custo computacional que seria envolvido na modelagem completa dos ventiladores. Para representar os ventiladores foi aplicada a condição (*Momentum Source*) aos cilindros representativos dos ventiladores. Essa condição é uma aproximação adequada para a avaliação em questão, uma vez que representa corretamente a vazão e as velocidades obtidas experimentalmente.

A condição de fonte de momento faz empregar uma determinada força por unidade de volume, ou seja, foi estimada a força em Newtons gerada pelo ventilador no volume que ele ocupa. Além disso, a velocidade de rotação de cada ventilador foi adequadamente empregada aos cilindros. O fluido de trabalho é ar à temperatura de 25 °C. A partir da simulação, os resultados de velocidade foram extraídos.

10. RESULTADOS

O intuito com as simulações foi realizar uma avaliação da homogeneidade do escoamento, ou seja, verificar o comportamento do escoamento e sua distribuição na área da cama de compostagem.

Os resultados a seguir demonstram as linhas de corrente para o ventilador LVHS e para o ventilador HVLS. As figuras que seguem apresentam um instante de tempo e, portanto, o escoamento pode sofrer pequenas variações. Essas variações são de pequena magnitude e não afetam os resultados de maneira significativa.

A Fig. 5 mostra as linhas de corrente, através de um ventilador HVLS, sendo possível notar que o escoamento advindo do ventilador, próximo ao solo, é orientado em todas as direções.

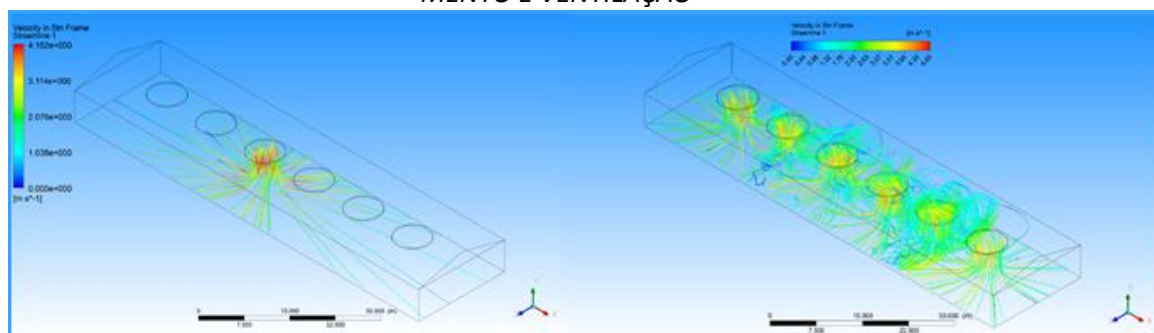


Figura 5- Linhas de corrente de um e mais HVLS

Fonte: Ansys, 2016.

A Fig. 6 mostra o escoamento advindo de um ventilador LVHS. O escoamento sai do ventilador em mais altas rotação e velocidade e se espalha próximo ao solo seguindo em direções próximas.

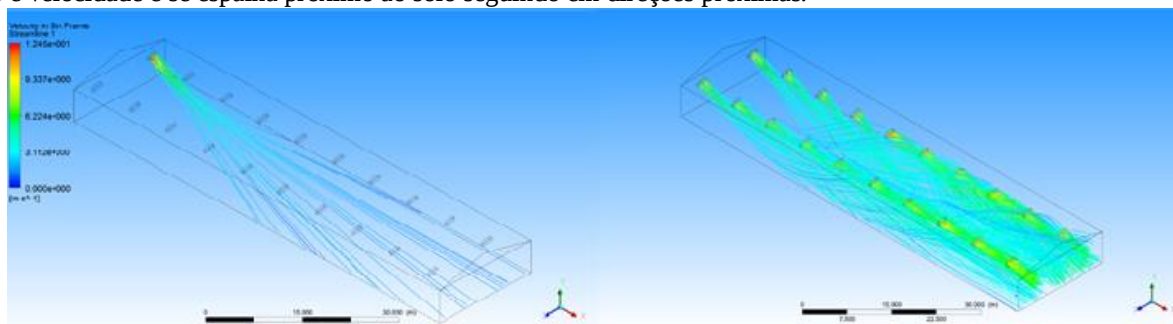


Figura 6 - Linhas de corrente de um LVHS e mais LVHS

Fonte: Ansys, 2016.

A Fig. 6 mostra as linhas de corrente provenientes dos seis ventiladores HVLS funcionando em conjunto. É possível notar que os modelos que estão nas extremidades dissipam o escoamento em todas as direções. Percebe-se, através da figura, a influência exercida pelo escoamento de um ventilador no ventilador adjacente. A mesma figura mostra as linhas de corrente nos vinte ventiladores LVHS dispostos ao longo do domínio. É possível notar que as linhas de corrente sofrem influência das adjacentes.

A Fig. 7 apresenta o campo de velocidades gerado pelos ventiladores HVLS e LVHS a uma altura de 0,70 m do solo. Abaixo de cada ventilador, especificamente no centro, há uma região de velocidades mais baixas. Ao redor dessa região, são desenvolvidas maiores velocidades (variando de 2,5 a 3,8 m/s). É possível notar regiões de maior velocidade que ocorrem entre os ventiladores adjacentes. Os ventiladores LVHS a 0,70 m do solo. Nota-se uma região com velocidades próximas de zero, que vai desde a entrada e avança até 7 m para dentro do domínio. Após essa região, há duas faixas identificáveis com velocidades mais altas no centro (em torno de 4 m/s) e mais baixas na periferia (em torno de 2,5 m/s).

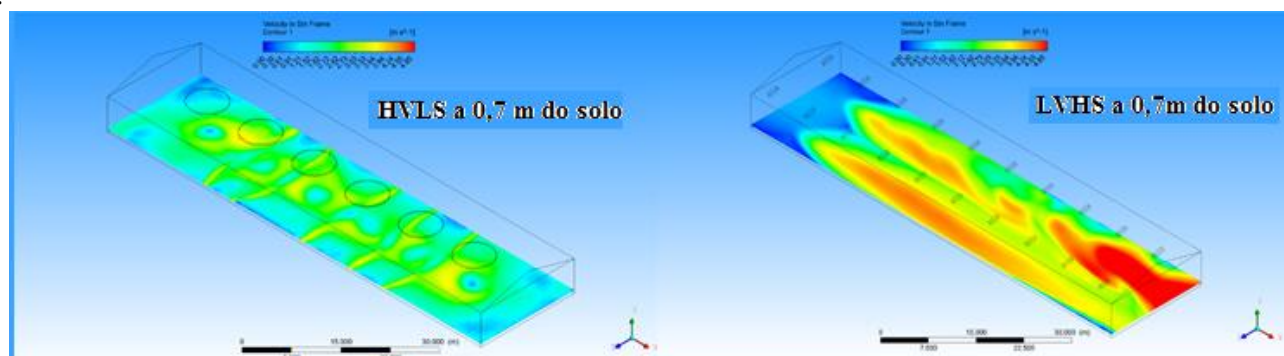


Figura 7 - Campos de velocidades LVHS e HVLS a 0,7m do solo

Fonte: Ansys, 2016.

Percebe-se uma região com velocidades em torno de 5 m/s que ocorre na faixa da direita ao fim do domínio. Isso é devido à instabilidade do escoamento oriunda do arranjo dos ventiladores. A média das velocidades para esse instante ocasionou uma aceleração do escoamento na região em questão.

Um aspecto igualmente importante a ser observado é relativo ao comparativo de consumo elétrico entre os sistemas analisados. A Tab. 6, a seguir descreve os dados técnicos de ambos os ventiladores.

TIPO DE VENTILADOR	LVHS	HVLS
QUANTIDADES (und)	20	6
VAZÃO UNITÁRIA (m³/h)	80.000	400.000
POTÊNCIA UNITÁRIA (kW)	2,25	1,5
CONSUMO TOTAL (kWh)	45	9

Tabela 6 - Grade comparativa do consumo elétrico dos ventiladores LVHS x HVLS:

Fonte - Dados obtidos nos catálogos dos fabricantes, 2016.

11 CONCLUSÃO

A análise comparativa dos fluxos gerados pelos ventiladores HVLS e LVHS demonstram informações visuais que permitem a avaliação para a determinação de melhor homogeneidade de fluxo. No presente estudo, verificou-se que os resultados estáticos indicam uma melhor homogeneidade no galpão com ventiladores HVLS, comparativamente às duas geometrias analisadas, pois observa-se que o fluxo de ar gerado pelos ventiladores HVLS apresenta menor área com velocidade próxima a zero. Todos os dados das análises simuladas em CFD estão coerentes com as observações feitas em campo, nos galpões de compostagem visitados pelo autor. Sendo assim, conclui-se que as referidas simulações foram totalmente viáveis, otimizando tempo e custos em realizações de testes, auxiliando na aquisição de dados e visualizações dos escoamentos do ar para melhor otimização dos fluxos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR16401, 2008. **Instalações de ar condicionado**. Abnt, 2008.
- ANSYS .2009. Ansys Fluent 13.0 - **Theory Guide** - Ansys, INC. Canonsburg, PA, USA.
- BAÊTA, F.C. 1985. **Responses of Lactating dairy cows to the combined effects of temperature, humidity and wind velocity in the warm season**, 218 F. Thesis (PhD) - University of Missouri, Missouri. USA.
- CARCANGIU, C. E. 2008. **CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines**. PhD Thesis, Università degli Studi di Cagliari, Itália.
- CASTRO, José. **Fenômeno dos transportes**. Apostila da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UFVASF). Obtido no portal da UFVASF. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/FT/Apostila_Transcal_Mecfluidos.pdf> Acessado em 08/02/2016.
- CHIAVASSA, Cristian et al. 2014. **Experiencias con el piso de compost**. VIII Congreso de Conservacion de Forrages y Nutricion. Rosario, Arg.
- DAMASCENO, Flávio et al. 2012. **A virtual guide to compost bedded pack barn design - Features and management considerations**. University of Kentucky College of Agriculture. Lexington, KY. USA.
- FROTA, A.B., SCHIFFER. S.R. 1987. **Manual do Conforto Térmico** - São Paulo, SP.
- LUZ, José L.R. 2012. **Análise numérica do desempenho da turbina eólica de eixo horizontal NREL UAE Phase VI** - Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MALISKA, Clóvis. 2004. **Transferência de calor e mecânica de fluidos computacional**. Florianópolis, SC.
- NÃÃS, Irenilza de Alencar. 1989. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. São Paulo, SP.
- PATANKAR, Suhas V. 1980. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**.
- VECINA, Jodar et al. 2015. **Application of Computational Fluid Dynamics for Evolution of Wind Power Potential in Simple Terrain** - ICWE.

DETERMINATION OF AIR FLOW MORE HOMOGENEOUS, COMPARATIVE OF TWO VENTILATION SYSTEMS FORCED BY FANS, APPLIED IN CONTAINMENT SHEDS OF DAIRY COWS IN BEDS COMPOSTING SYSTEM (COMPOST BARN).

ABSTRACT. In the search for milk high productivity, many techniques have been developed by professionals, among which stands out the "Compost bedded dairy barn system", commonly called Compost Barn (Composting Barn), which was created by North Americans dairymen, in the 80s, but, only in 2001, began to be applied on a larger scale by dairy farms in other countries, among them, Brazil. The system consists in build open sides sheds, having in the low-floor, wood sawdust or another available dry vegetable. The cows walk freely in these sheds, constantly expelling feces and urine on the sawdust, forming a mass with bacteriological activity, which generates heat and gas emissions. The ventilation in these sheds has the function of dehumidifying, dilute gases and cooling the bed function, improving the conditions of thermal comfort of the animals confined in there. The forced ventilation systems are analyzed by ceiling fans with high volume low speed technology (HVLS) and fans Low Volum High Speed (LVHS). With the analysis of both systems in Computational Fluid Dynamic (CFD), we conclude that the fans type HVLS have the most homogeneous and energy efficient ventilation system.

Keywords: Compost Barn. Ventilation lactating cows. Ventilation composting sheds.