

# Fluidodinâmica computacional aplicada ao estudo aerodinâmico e térmico em robô de combate

Flavio Alves Damasceno<sup>1</sup>, Flávia Roberta Vale Campos<sup>2</sup>, Carlos Eduardo Alves Oliveira<sup>3</sup>, Jairo Alexander Osório Saraz<sup>4</sup>, Leidimar Freire Brandão Damasceno<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Doutorado em Engenharia Agrícola, Professor da Universidade Federal de Lavras, [flavio.damasceno@deg.ufla.br](mailto:flavio.damasceno@deg.ufla.br);

<sup>2</sup>Graduanda em Eng. Controle e Automação, Universidade Federal de Lavras, [flaviaroberta@engautomacao.ufla.br](mailto:flaviaroberta@engautomacao.ufla.br);

<sup>3</sup>Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, [carlos.oliveira@engagricola.ufla.br](mailto:carlos.oliveira@engagricola.ufla.br);

<sup>4</sup>Doutorado em Engenharia Agrícola, Professor da Universidad Nacional de Colômbia, Medellín, [aosorio@unal.edu.co](mailto:aosorio@unal.edu.co);

<sup>5</sup>Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, [leidimarbrandao@gmail.com](mailto:leidimarbrandao@gmail.com);

**Resumo** – Desde a criação dos primeiros modelos de robô de combate motorizados, percebeu-se a importância de se estudar a aerodinâmica destes. A análise da aerodinâmica neste tipo de robô atinge diretamente seu desempenho, influenciando a sua velocidade, eficiência, e também o arrefecimento do compartimento do motor. A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma técnica prática e confiável de se fazer simulações, onde ao se utilizar essa ferramenta, dispensa-se grande quantidade de testes experimentais. Objetivou-se com o presente trabalho, validar um modelo computacional em mecânica dos fluidos computacional (CFD) para a predição da temperatura e velocidade do ar de um robô de combate, visando melhorias na dissipação de calor dos motores. Para tanto, o projeto foi dividido em três etapas. Na primeira, foi realizada uma avaliação das características aerodinâmicas do veículo de combate. Na segunda, avaliou-se as condições operacionais e aerodinâmicas de um túnel de vento. E na terceira etapa, desenvolveu-se e testou-se um modelo computacional tridimensional do robô de combate. Portanto, concluiu-se que o proposto modelo computacional pode ser utilizado como uma ferramenta útil para o desenvolvimento de dispositivos e seleção de sistemas para distribuição de calor em robô de combate.

**Palavras-chave:** Simulação computacional, Túneis de vento, Modelo matemático.

**Abstract** – Since the first models of motorized combat robot, it was realized the importance of studying the aerodynamics. The analysis of aerodynamics in this type of robot directly affects the performance, speed, efficiency, and the cooling of the engine compartment. Computational Fluid Dynamics (CFD) is a practical and reliable technique to make simulations, dispensing many tests of experimental tests. The objective of this study was to validate a computational model in computational fluid mechanics (CFD) for the prediction of temperature and air velocity of a combat robot, aiming at improvements in the heat dissipation of the engines. Thus, the study was divided into three stages: a) In the first, an evaluation of the aerodynamic

characteristics of the combat robot was carried out; b) In the second, the operational and aerodynamic conditions of a wind tunnel were evaluated; c) and finally, a 3D computational model of the combat robot was developed and tested. Therefore, it was concluded that the proposed computational model can be used as a useful tool for the development of devices and selection of systems for heat distribution in combat vehicles.

**Keywords:** Computational simulation; Wind Tunnels; Mathematical model.

## I. INTRODUÇÃO

A história da guerra de robô de combate não possui muitos registros oficiais. A primeira competição surgiu em 1994, inspirada no filme Star Wars, na Robot Wars. Desde então, a competição cresceu e, em 2002, nos EUA foi criada a Robot Fighting League (RFL), onde surgiram as primeiras regras e o sistema de pontuação para a competição, além de organizar de 2004 a 2013 a Olimpíada Mundial de Robótica – Robogames [1].

No Brasil, seguindo a tendência Norte Americana, o combate de robôs surgiu na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em 2001. Já em 2002, a competição vincula-se ao Encontro Nacional de Estudantes de Controle e Automação (ENECA), organizadas com base nas regras da RFL pela liga Guerra de Robôs que mais tarde torna-se a RoboCore. A RoboCore, instituição que realiza competições robóticas, cria em 2005 a Winter Challenge, e em 2010 a Summer Challenge. Atualmente, o combate de robôs difundiu-se e existem competições em vários países, dentre eles destacam-se as competições nos EUA, México, Reino Unido, Índia e Austrália [2].

Nestas competições, os robôs de combate se enfrentaram com o objetivo de destruir o oponente através de um combate que acontece numa arena isolada e cada robô é controlado por controle remoto. Normalmente, um combate dura alguns minutos, exigindo muita potência do equipamento. Ao final do combate, o desgaste das peças é elevado e a temperatura interna do robô pode passar facilmente dos 100°C, podendo danificar motores e circuitos elétricos [3].

Diante disto, existe a necessidade no desenvolvimento de mecanismos que possam dissipar o calor interno. Tais dispositivos, podem implicar no aumento da potência e menor desgastes das peças, obrigando cada equipe a criar soluções inovadoras para se manterem competitivas em suas batalhas. Porém, várias limitações como dificuldade de se encontrar quantidade suficiente de equipamentos com características operacionais similares no mesmo local e altos custos para implantação de experimentos, não permitem que estudos que abranjam um maior número de variáveis e fatores sejam testados em laboratório. Assim, uma possível resposta ao problema pode ser obtida por meio de simulações computacionais em uma primeira etapa, para em seguida, serem testadas em laboratório apenas os tratamentos de interesse [2].

A dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) tem potencial para quantificar, de forma eficaz e precisa, as variáveis térmicas no interior e aerodinâmicas no exterior dos robôs de combate. Várias condições de projeto podem ser testadas dentro de um ambiente virtual, reduzindo o número de experimentos físicos. Soluções espaciais e temporais de temperatura e velocidade podem ser reproduzidas através de simulações computacionais.

Desta forma, objetivou-se com o presente trabalho é validar um modelo computacional em mecânica dos fluidos computacional (CFD) para a predição da temperatura e velocidade do ar de um robô de combate, visando melhorias na dissipação de calor dos motores.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no laboratório de Construções Rurais e Ambientância da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil, possuindo dimensões de 5,6 x 5,7 m e altura do teto de 3,0 m, equipado com dois sistemas de ar condicionados de 18.000 BTUs para controlar a temperatura no interior da sala experimental.

### A. Características do robô de combate

Neste estudo, utilizou-se um robô de combate modelo Drum de 13,4 kg, batizado de Pégasus e desenvolvido para atuar em competições de combate na categoria *Featherweight* de até 13,6 kg. Nesse tipo de robô, a arma é um tambor giratório com dentes, sendo uma variação dos *Vertical Spinners*, porém tendo o diâmetro de giro menor, e a largura da arma maior. O cilindro, chamado de *Eggbeater* gira de modo a levantar ou lançar o adversário, acumulando nele o dano sofrido no impacto e na queda. Esse robô tem a vantagem de acumular menos momento de inércia e um menor tempo de aceleração que os *Vertical Spinners*, além de ter um centro de gravidade mais baixo, ganhando estabilidade. Como possuem um efeito giroscópio menor, fazem curvas mais facilmente. Têm também maior facilidade em atingir os oponentes, porque não precisam estar

perfeitamente alinhados para fazê-lo, além de não necessitarem de muita altura para apoiar a arma.

A estrutura do robô de combate utilizado neste estudo foi composta majoritariamente por alumínio 7050 por apresentar excelente usinagem e estabilidade, assim como dureza e elevada resistência. Suas laterais formavam uma única peça com a traseira, cortada a jato de água com um formato semelhante a uma elipse e com dimensões máximas de aproximadamente 405 mm x 316 mm. Utilizou-se o formato arredondado para evitar uniões com outras peças, apresentando uma melhor distribuição de energia e proteção das rodas otimizada, otimizando o espaço interno. Para cobrir a parte superior e inferior, protegendo os circuitos internos e motores, foram utilizadas duas chapas de alumínio 2024 com espessura de 3 mm, fixadas por meio de parafusos. Duas peças feitas em plástico foram utilizadas para proteger os circuitos eletrônicos do robô, internamente. O sistema de locomoção do robô foi composto por duas rodas e dois motores (DeWalt 18V, 1125 rpm/V, New Style). Cada motor é acoplado a uma caixa redução RC-DWNS, que é fixada à base do robô por parafusos, e reduz a taxa de giro na proporção de 17:1. As rodas de borracha (Colson Performa, 4" x 1/4") eram ligadas à saída da caixa de redução por meio de uma chaveta de aço, que transmitia o movimento de seu eixo.

### B. Caracterização do túnel de vento climatizado

Para realização dos testes experimentais foi utilizado um túnel de vento climatizado (0,8 x 5,0 m), feitos de placas de aço e tubos de PVC, conforme pode observar na Figura 1.

Figura 1 – Detalhe externo do túnel de vento climatizado.



Fonte: Autores.

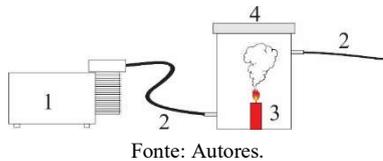
Nestes túneis, a velocidade do ar era controlada manualmente através de potenciômetros conectados a ventiladores de exaustão de 0,40 m de largura e fluxo máximo de 4200 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. A área atribuída ao veículo de combate (0,60 x 0,40 m e 0,40 m de altura) foi coberta com filme plástico altamente transparente para permitir a captura de imagens digitais e termográficas. Maiores detalhes sobre os túneis de vento climatizados podem ser observados em [4].

Para reduzir a turbulência do fluxo do ar na seção de teste do túnel de vento, garantindo um fluxo laminar, foi construído dois painéis de pequenos tubos plásticos

colados. Cada painel tinha as dimensões de 0,4 x 0,8 m e era preso a dois suportes de madeira. Para a melhor eficiência, o comprimento do tubo plástico foi 6 vezes o diâmetro dos tubos, conforme recomendado por [5].

Para garantir uma melhor visualização do efeito aerodinâmico sobre a superfície do veículo de combate, desenvolveu-se um sistema injetor de fumaça composto por um mini compressor (Schulz, mod. Jet Fácil, 1 cv, 40 lb), tubos plásticos, recipiente de queima e bomba de fumaça (branca), conforme apresentado no esquema da Figura 2. Uma cartolina de cor preta fosca foi colada com fita na base e na parede interna do túnel para facilitar a visualização da fumaça.

Figura 2 – Esquema de montagem do sistema injetor de fumaça utilizado neste estudo. Legenda: 1) Mini compressor; 2) Tubos plásticos; 3) Bomba de fumaça; e 4) reservatório de queima.

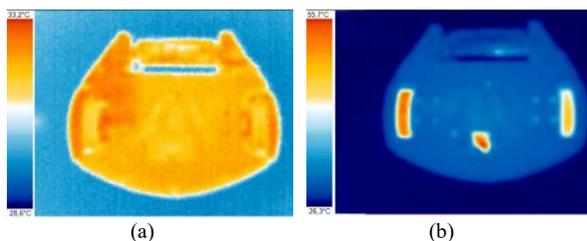


No reservatório de queima que possuía dois orifícios (entrada e saída) foi adicionada a bomba de fumaça que logo após iniciado a queima, o reservatório era fechado e injetava-se ar por meio de um mini compressor, forçando a fumaça a sair por um tubo plástico de saída que ficou situado dentro do túnel de vento. Com isto, uma série de imagens digitais foram feitas para que melhor se observasse o efeito aerodinâmico sobre a superfície do robô de combate.

### C. Medição e instrumentação

As temperaturas superficiais ( $T_s$ ) do robô de combate foram registradas utilizando uma câmera termográfica (Instrutemp®, mod. ITTMV-100 e precisão de  $\pm 2\%$  na leitura). Foram obtidas imagens termográficas cobrindo toda a extensão do robô (Figura 3). As temperaturas superficiais foram registradas com o robô desligado e após uma simulação de combate durante 10 minutos. As imagens foram processadas usando o software da própria câmera, a partir de pontos selecionados aleatoriamente sobre a superfície do veículo. A emissividade adotada foi de 0,95 [6].

Figura 3 – Imagem térmica do veículo de combate antes (a) e (b) após a simulação de combate.



A temperatura ( $T_{ar}$ ) e velocidade do ar ( $V_{ar}$ ) foram medida manualmente por meio de um anemômetro de fio-quente (Testo®, mod. 416 e resolução de 0,1 m/s) posicionado numa malha regular com nove pontos no interior do túnel de vento climatizado. Para melhor localização exata dos pontos, a malha foi confeccionada utilizando fio de cobre (1,0 mm) e posicionada 40 cm a frente do robô de combate.

### D. Modelagem numérica

As taxas de ventilação estão associadas a fluxos turbulentos e quando combinados com as taxas de transferência de calor geram interações de difíceis resoluções, principalmente por um método que não seja computacional. Assim, a técnica de CFD utilizada neste estudo foi realizada por meio da solução para o número de Reynolds médio formado nas equações de Navier – Stokes, discretizando o campo do fluxo e baseado na técnica de volumes finitos.

O modelo que descreve o escoamento fluido não isotérmico é descrito por meio das equações da continuidade “equação 1”, momento “equação 2” e energia “equação 3”, simplificadas a seguir [7], onde:  $\rho$  é a densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $U$  é o vetor velocidade;  $p$  é a pressão ( $\text{N m}^{-2}$ );  $\mu$  é viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $T$  é a transposição do tensor;  $k$  é a condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ );  $c_p$  é o calor específico ( $\text{W kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) e  $Q$  é o termo fonte ( $\text{W m}^{-3}$ ).

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho U U) = \nabla p + [\mu_\tau (\nabla U + \nabla U^T)] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T U) = Q \quad (3)$$

O escoamento turbulento foi modelado por meio do modelo  $k-\epsilon$  padrão “equação 4”, que segundo [8] avalia a viscosidade ( $\mu_t$ ) a partir de uma relação entre a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a dissipação da energia cinética turbulenta ( $\epsilon$ ).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

Em que os valores de  $k-\epsilon$  são obtidos por meio das “equações 5 e 6”, onde:  $\eta$  é a razão entre o fluxo médio e escala temporal;  $a, b$  são constantes iguais a 2,9 e 0,75;  $C_\mu$  é igual a 0,09;  $C_{1\epsilon}$  é igual a 1,44;  $C_{2\epsilon}$  é igual a 1,92;  $\sigma_\epsilon$  é igual a 1,0;  $\sigma_k$  é igual a 1,3;  $t$  é a turbulência;  $\eta$  é a razão entre o fluxo médio e escala temporal; e  $k$  é a condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

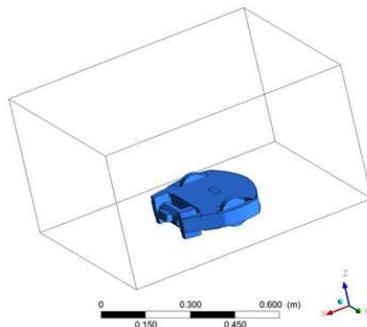
$$-\nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k s} \right) \nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k = \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k s} + (\nabla U + \nabla U^T)^2 - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$-\nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \rho U \cdot \nabla \epsilon = \rho C_{1\epsilon} C_\mu k + (\nabla U + \nabla U^T)^2 - \rho C_{2\epsilon} \frac{s^2}{k} \quad (6)$$

### E. Condições de contorno

A etapa inicial da simulação em CFD consiste na definição do domínio de cálculo, ou seja, define-se a geometria na qual pretende se aplicar a resolução numérica das equações que descrevem os fenômenos a serem investigados. Assim, todos os resultados de simulações do presente trabalho foram obtidos a partir da utilização do pacote ANSYS 14.0 (Figura 4). O software e a licença temporária do pacote ANSYS é propriedade do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras.

Figura 4 – Desenho da estrutura externa do robô de combate.



Fonte: Autores.

Devido à complexidade da geometria, optou-se pela utilização do software ANSYS ICEM CFD para a construção de uma malha computacional tetraédrica. Foram realizados testes de malha para averiguar a viabilidade de cada malha e foram analisados diferentes níveis de refinamento, com a finalidade de verificar o seu efeito sobre os gradientes em nível espacial e temporal.

Em seguida, foi desenvolvido um modelo computacional utilizando a CFD, implementado no programa comercial CFX® (ANSYS Inc, 2007), versão 14. As distribuições de velocidade do ar e da temperatura de entrada e saída no túnel de vento foram determinadas por meio deste modelo computacional. As amostras foram modeladas no software ANSYS CFX e a partir da modelagem dos ensaios foi possível analisar o comportamento do fluxo de ar quando submetidas a 3 diferentes velocidades do ar de entrada no túnel e de 3 diferentes temperaturas na superficiais, conforme apresentado na “Tabela 1”. Os valores de velocidade do ar e temperatura superficial no robô de combate foram selecionados por meio de valores mínimos e máximos coletados por imagens térmicas em laboratório.

Tabela 1 – Tratamentos testados na simulação computacional.

Tratamentos	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
A	0,1	50
		75
		100
B	1,0	50
		75
		100
C	3,0	50
		75
		100

Para a realização da simulação no modelo computacional, adotou-se as seguintes premissas: regime permanente; escoamento monofásico (fluido: ar); condição com energia térmica; escoamento incompressível; regime turbulento.

Foi adotado um resíduo médio dos sistemas lineares (RMS, Root Mean Square) menor do que  $10^{-4}$  como critério de convergência, com 1000 iterações.

As dimensões internas e condições de operação do túnel de vento com o robô de combate situado internamente foram usadas para gerar o modelo em CFD. Assim, os valores medidos na fase experimental foram usados nas condições de contorno no modelo.

Após as simulações computacionais, um novo modelo foi proposto do robô de combate com um dissipador de calor com superfícies de aletas foi dimensionado determinando a eficiência de uma aleta. Uma medida do desempenho de uma aleta é a sua eficiência, que leva em conta o fato de que a taxa máxima de energia na qual uma aleta poderia dissipar é a taxa que existiria se toda a superfície estivesse na temperatura da base. Porém, essa condição é apenas uma idealização, já que um gradiente de temperatura deve existir, uma vez que a aleta é uma resistência condutiva finita. A expressão para obtenção da eficiência de uma aleta está descrita na “Equação 7”, recomendada por [9].

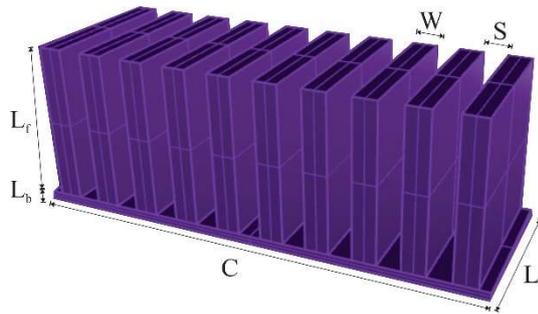
$$\eta_a = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (7)$$

$$L_c = L_f + w/4 \quad (8)$$

$$m = \sqrt{\frac{4h}{kw}} \quad (9)$$

Onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 K$ ),  $k$  é a condutividade do material ( $W/m^2 K$ ),  $w$  é a espessura da aleta (m),  $L_c$  é o comprimento característico (m) e  $L_f$  é o comprimento da base até a ponta da aleta, conforme (Figura 5).

Figura 5 – Parâmetros geométricos do dissipador de calor utilizados neste estudo.



Fonte: Autores.

Esta eficiência da aleta caracteriza o desempenho de apenas uma única aleta. Para descrever um conjunto de aletas e a base à qual elas estão fixadas deve-se calcular a eficiência global da superfície ( $\eta_o$ ) conforme a “Equação 10”:

$$\eta_o = 1 - (1 - \eta_a) \frac{NA_a}{A_t} \quad (10)$$

onde  $\eta_o$  é a eficiência de uma aleta (%), N é o número de aletas,  $A_a$  é a área da superfície de cada aleta ( $m^2$ ) e  $A_t$  a área superficial total ( $m^2$ ).

Os resultados do modelo CFD foram verificados e comparados com os correspondentes dados obtidos experimentalmente. A concordância entre os valores medidos e descritos pelo modelo CFD, foram avaliados calculando-se a média quadrada do erro normalizado (NMSE) “equação 11” recomendado pela [10], e para isso foram tomadas uma amostra de 45 dados experimentais. Quando se tem muita concordância entre o valor medido e o valor previsto, o NMSE tem valor igual a 0. Os valores menores de 0,25 de NMSE são aceitos como bons indicadores de concordância.

$$NMSE = \frac{(\overline{Cp} - \overline{Co})^2}{(\overline{Cpm} \cdot \overline{Com})} \quad (11)$$

$$(\overline{Cp} - \overline{Co})^2 = \frac{\sum (Cpi - Coi)^2}{n} \quad (12)$$

Em que:  $C_{pi}$  é o valor previsto,  $C_{oi}$  é o valor medido;  $C_{pm}$  é a média do valor previsto;  $C_{om}$  é a média do valor medido; n é o número de medidas.

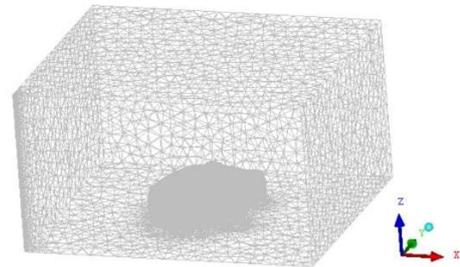
Modelos NMSE tem sido utilizado para verificar e validar vários estudos com simulações computacionais em CFD [11], [12], [13].

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes com diferentes tamanhos de malhas foram realizados até que não houvessem diferenças significativas entre os dados medidos e simulados ( $p < 0.05$ ). Como resultado, uma malha de 490.193 elementos tetraédricos (Figura 6), para o qual se obteve um sistema composto por 86.141 nós. O número de

Reynolds para o problema proposto foi de  $5.522 \cdot 10^4$ , o que indicou um escoamento turbulento no interior do túnel de vento.

Figura 6 – Resultado da geração da malha pelo CFD.



Fonte: Autores.

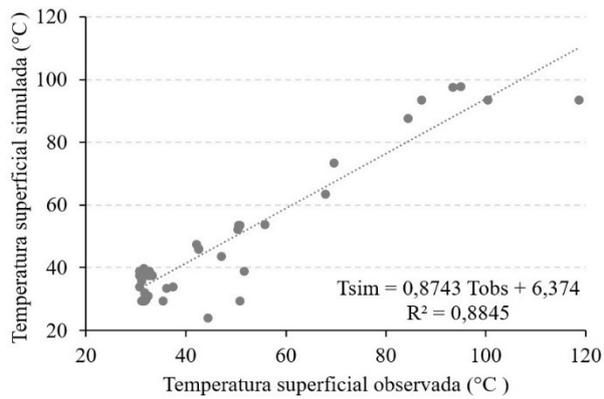
Para validar o modelo computacional, uma comparação dos dados descritos pelo modelo CFD desenvolvido e os dados experimentais mostram que os valores médios de temperatura superficial e velocidade do ar não diferem significativamente entre os valores experimentais e os valores do modelo, apresentando uma média quadrada do erro normalizado (NMSE) de 0,02 e 0,23, respectivamente. Isto indica haver uma boa concordância entre os resultados, conclui-se que o modelo em CFD pode ser usado para prever o comportamento médio da temperatura e velocidade do ar ao longo do duto de distribuição de calor “Tabela 2”.

Tabela 2 – Comparação de dados experimentais e do modelo CFD para a temperatura superficial ( $T_s$ ) e velocidade do ar ( $V_{ar}$ ).

Dados	$T_s$ (°C)		$V_{ar}$ (m s <sup>-1</sup> )	
	Real	Modelo CFD	Real	Modelo CFD
Média	43,7	44,6	1,08	1,33
NMSE	0,02		0,23	

Por meio de análise estatística preliminar verificou-se que não existe diferença significativa entre os valores de temperatura superficial (teste t,  $P = 0,100$ ) do robô de combate, resultando em um valor de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,8845. A expressão ajustada é estatisticamente significativa (teste F,  $P=0,1881$ ), proporcionando erro médio de  $43,6 \pm 3,8^\circ C$ . O comportamento da temperatura superficial medida e simulada está ilustrada na (Figura 7, ao qual pode-se observar uma boa concordância entre as temperaturas superficial medida e simulada.

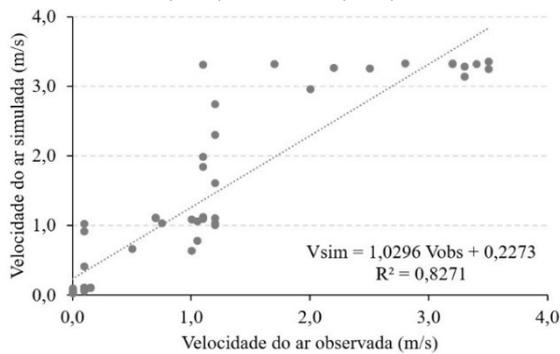
Figura 7 – Comportamento da temperatura superficial do robô de combate simulada (Tsim) e observada (Tobs).



Fonte: Autores.

O comportamento da velocidade do ar simulada no interior do túnel de vento, logo após passar pelo robô, apresentou um valor médio de  $1,33 \text{ m s}^{-1}$ , não diferindo significativamente pelo teste t ( $P < 0,0001$ ) do valor médio experimental que foi de  $1,08 \text{ m s}^{-1}$ . A equação ajustada foi estatisticamente significativa (teste F,  $P < 0,0001$ ), com  $r^2$  de 0,8271. A Figura 8 ilustra o comportamento das velocidades do ar observada e simulada no interior do túnel de vento logo após passar sobre o robô de combate.

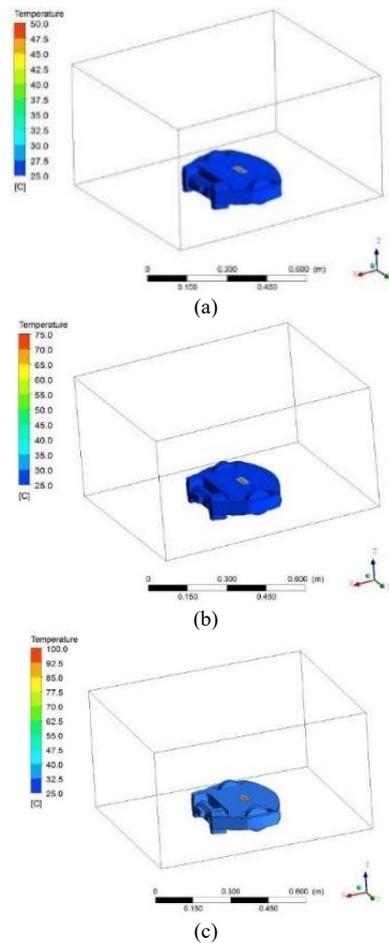
Figura 8 – Comportamento da velocidade do ar simulada (Vsim) e observada (Vobs).



Fonte: Autores.

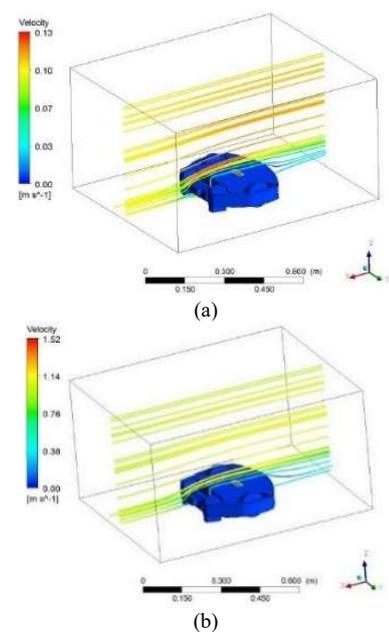
Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se a distribuição da temperatura superficial no robô de combate com diferentes velocidades do ar (0,1, 1,0 e 3,0 m/s) de entrada no túnel de vento e temperatura superficial (50, 75 e 100°C). Pode-se observar que a temperatura superficial quase não sofreu uma dissipação, principalmente próximo a região do motor (Figura 9), devido aos baixos valores de velocidade do ar sobre a superfície do robô (Figura 10), comprovando a necessidade de desenvolver um dispositivo para dissipar melhor o calor.

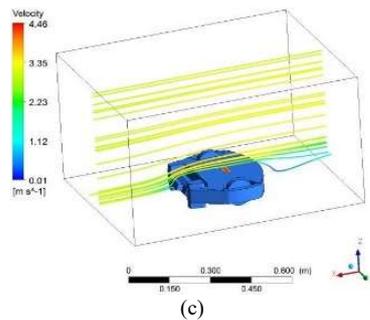
Figura 9 – Distribuição da temperatura superficial no robô de combate sem o dispositivo dissipador de calor.



Fonte: Autores.

Figura 10 – Comportamento da velocidade do ar no interior do túnel de vento com o robô de combate.





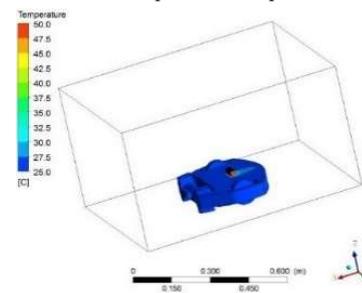
(c)  
Fonte: Autores.

Diante dos resultados apresentados anteriormente, realizou-se simulações do robô de combate com um dispositivo dissipador de calor com aletas acoplado sobre a região mais quente. Para o dimensionamento, utilizou-se as “equações 7 a 10”. Para isto, foram desenvolvidos vários dissipadores variando suas principais grandezas geométricas de forma proporcional e qualitativa a fim de verificar qual delas teria maior influência na retirada de calor. Assim, desenvolveu-se uma análise dos fatores geométricos utilizando diferentes combinações entre a altura da aleta ( $L_f$ ), espessura da aleta ( $W$ ), passo entre as aletas ( $S$ ) e o número de aletas ( $N$ ), conforme descrito na Figura 9. Ressalta-se que o comprimento ( $C$ ) e largura ( $L$ ) dos dissipadores respeitaram as dimensões da superfície aquecida sobre o robô de combate utilizado neste estudo, sendo estes com tamanhos de 60 mm x 20 mm. Os valores de  $h$  e  $k$  para o alumínio foram iguais a 22,38 W/m<sup>2</sup>K e 238,93 W/m K [9]. Após os cálculos, verificou-se que os parâmetros que obtiveram melhores valores de eficiência de dissipação de calor (0,991) foram  $L_f$ ,  $L_b$ ,  $W$  e  $S$  foram iguais à 20 mm, 1 mm, 3 mm e 3 mm, respectivamente.

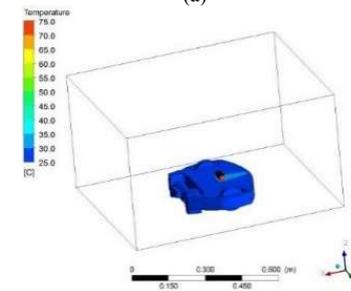
Para evitar qualquer influência aerodinâmica ao desempenho do robô de combate e melhorar a eficiência na redução de calor, o dissipador foi acoplado na vertical para aumentar a passagem do fluxo de ar sobre a superfície das aletas. Segundo [14], os dissipadores de calor com aletas são instalados na base horizontal do dissipador, o fluxo de ar circula apenas para as paredes laterais das aletas, sendo que neste caso têm menores dimensões que a base, não oferecendo assim tanto resfriamento, como quando o dissipador está verticalmente disposto.

Deste modo, a partir dos dados simulados no modelo computacional utilizando o dispositivo de dissipação de calor dimensionado, pode-se perceber que as aletas distribuíram melhor a temperatura superficial proporcionando maior segurança as partes internas do robô, evitando maiores danos os circuitos eletrônicos (Figuras 11 e 12).

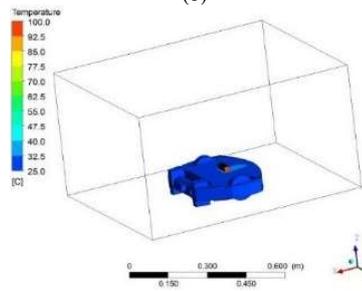
Figura 11 – Distribuição da temperatura superficial no robô de combate com o dispositivo dissipador de calor.



(a)



(b)

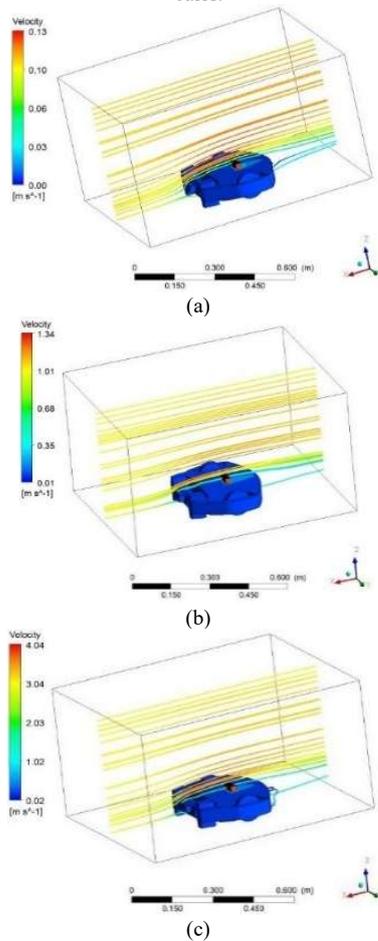


(c)

Fonte: Autores.

Conforme pode ser observado pela Figura 11, o dispositivo dissipador de calor não apresentou grande variação na velocidade do ar, sendo que o comportamento do fluxo de ar foi basicamente o mesmo (Figura 12). No geral, valores de velocidade do ar foram ligeiramente maiores próximo a superfície do dissipador de calor. Em relação a temperatura superficial, o dispositivo dissipador de calor promoveu uma redução média de 15,2°C para velocidade do ar de 0,1 m/s (Figura 11a). Para velocidade do ar de 1,0 m/s, a redução média foi de 24,1°C (Figura 11b). Maiores valores de redução média da temperatura superficial (30,4°C) foram observados quando a velocidade do ar foi de 3,0 m/s.

Figura 12 – Comportamento da velocidade do ar no interior do túnel de vento no robô de combate com o dispositivo dissipador de calor.



Fonte: Autores.

Analisando o campo de velocidade do ar, pode-se observar que o dispositivo dissipador de calor com aletas desviou o fluxo de ar para a parte posterior do robô de combate, dando origem a formação dos vórtices na parte posterior, podendo ser visualizado o comportamento pela Figura 12c.

#### IV. CONCLUSÕES

O modelo computacional proposto em CFD apresenta uma boa correlação com os dados experimentais, podendo ser usado para prever em tempo real, o comportamento da distribuição da temperatura superficial e comportamento da velocidade do ar em robôs de combate. Portanto, este modelo computacional pode ser utilizado como uma ferramenta útil para testar novos modelos, podendo auxiliar o engenheiro na tomada de decisão.

Ademais, o modelo CFD representou claramente o efeito da distribuição da temperatura superficial e o comportamento da velocidade do ar. Deste modo, com base nos resultados apresentados neste estudo, observou-se a necessidade no desenvolvimento de um sistema de distribuição de calor.

O modelo proposto com dissipador de calor apresentou valores médios de redução de temperatura superficial satisfatórios (maiores que 15,2°C). Portanto, este modelo computacional pode ser utilizado como uma ferramenta útil para o desenho e seleção de sistemas de distribuição de calor em robôs de combate.

Para futuros trabalhos, modelos computacionais em CFD podem ser utilizados para preverem a distribuição de calor superficial em robôs de combate com diferentes valores de velocidade do ar, tipos de materiais, dimensões e modelos de dissipador.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro ao projeto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ROBOT COMBAT. The history of robotic combat. Disponível em: <http://www.robotcombat.com/history.html>. Acesso em 10 jun. de 2017.
- [2] MEGGIOLARO, M. A. RioBotz Combot Tutorial, versão 2.0, 2009. Disponível em: <https://www.riobotz.com>. Acesso em 05 jul. 2017.
- [3] UAIRRIOR. Guerra de Robôs. Disponível em: <http://www.uairrior.com.br>. Acesso em 10 jun. de 2017.
- [4] SCHIASSI, L.; YANAGI JUNIOR, T.; ABREU, L. H. P.; REIS, G. M.; DAMASCENO, F. A.; SILVA, G. C. A. E.; CAMPOS, A. T. Laboratory Proposal for Studies on Poultry Environment. **International Journal of Engineering Research and Applications** (IJERA), v. 4, p. 65-74, 2014.
- [5] RAE, W. H.; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1984.
- [6] MONTANHOLI, Y.R.; ODONGO, N. E.; SWANSON, K. C.; SCHENKEL, F. S.; McBRIDE, B. W.; MILLER, S. P. Application of infrared thermography as an indicator heat and methane production and its use in the study of skin temperature in response to physiological events in dairy cattle (*Bos taurus*). **Journal of Thermal Biology**, Ontario, v. 33, p. 468-475, 2008.
- [7] AHMADI, A. H.; HASHEMABADI, S. H. 3D CFD simulation and experimental validation of particle-to-fluid heat transfer in a randomly packed bed of cylindrical particles. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 35, p. 1183-1189, 2008.
- [8] LAUNDER, B.; SPALDING, D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flow Computer Methods. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 269-289, 1974.

- [9] MIRANDA JÚNIOR, E. J. P.; GONÇALVES, R. S. Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção. **Revista E.T.C. Educação, tecnologia e cultura**, n. 14, p. 1-12, 2016.
- [10] ASTM. 2002. Guide for statistical evaluation of indoor air quality models (D5157-97). In **ASTM Standards on Indoor Air quality**, 2nd edition. p. 68-71. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing Materials, 2002.
- [11] ZHAO, J.; MANBECK, H.B.; MURPHY, D. J. Computational fluid dynamics simulation and validation of h<sub>2</sub>s removal from fan-ventilated confined-space manure storages. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 6, 2007.
- [12] DEMAEL, E.; CARISSIMO, B. Comparative evaluation of an Eulerian CFD and Gaussian plume models based on prairie grass dispersion experiment. **Journal of applied meteorology and Climatology**, v. 47, n. 1, p. 888-900, 2007.
- [13] OSÓRIO, J. A. S.; ROCHA, K. S. O.; DAMASCENO, F. A.; HERNANDEZ, R. O.; TOBON, J. C. A. A CFD approach to assess the effects of different opening combinations in poultry houses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 852-857, 2017.
- [14] SILVA, V. A. **Análise experimental da influência dos parâmetros geométricos de dissipadores na convecção natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, 100p. 2015.