



# Dimensionamento de um sistema de arrefecimento para um motor de relutância variável para aplicações agrícolas

**Palavras-Chave:** SISTEMA DE ARREFECIMENTO, MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL, SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA

**Autores:**  
**Gabriel Marques, FEM**  
**Prof. Dr. Marcelo Vinicius de Paula, FEM, DSI**

**Resumo:** Atualmente, há um grande interesse em ampliar o uso de motores elétricos como forma de mitigar as mudanças climáticas. Nesse contexto, uma rede térmica de parâmetros concentrados (LPTN) para um motor de relutância variável (MRV) é desenvolvida a partir da combinação de modelos condutivos disponíveis na literatura (utilizados para descrever cada componente do motor) e correlações de transferência de calor por convecção (utilizadas para quantificar a troca térmica no ar contido pela carcaça, no entreferro e no sistema de resfriamento). Quando comparadas com um software de referência da indústria para o projeto de motores elétricos, as temperaturas resultantes nos principais pontos de interesse do motor apresentam notável precisão (com uma diferença de  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  na temperatura das extremidades dos enrolamentos). Adicionalmente, o modelo proposto permite análises transientes — uma característica ausente na maioria dos modelos disponíveis na literatura.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento dos problemas decorrentes das mudanças climáticas [1] e a elevada contribuição dos motores de combustão interna para as emissões de  $\text{CO}_2$  [2], é natural que os motores elétricos se tornem preferidos para a propulsão de veículos. Nesse contexto, os motores de relutância variável (MRVs) surgem como opções fortes devido à sua alta eficiência, alcançando níveis de desempenho IE4 [3]. Para que os MRVs funcionem adequadamente, é necessário um bom sistema de resfriamento para dissipar as perdas térmicas do motor. No entanto, há uma carência de pesquisas na literatura sobre o uso de MRVs em máquinas agrícolas, que é o principal tema de estudo deste artigo: o desenvolvimento de um sistema de resfriamento adequado para um MRV a ser utilizado em máquinas agrícolas.

## 2. MODELO TÉRMICO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS

### 2.1 Transferência de calor por condução

Como os motores de relutância variável são majoritariamente cilíndricos, faz sentido descrever seus componentes como massas cilíndricas. Para esse fim, podem ser utilizados circuitos térmicos de cilindros e de segmentos de arco cilíndrico.

#### 2.1.1 Modelo térmico de cilindro oco

Um circuito térmico amplamente utilizado para modelar a condução de calor em cilindros ocos pode ser obtido a partir da solução da lei de Fourier e está ilustrado na Figura 1. As equações de resistências

térmicas desse circuito podem ser encontradas em [4], [5].

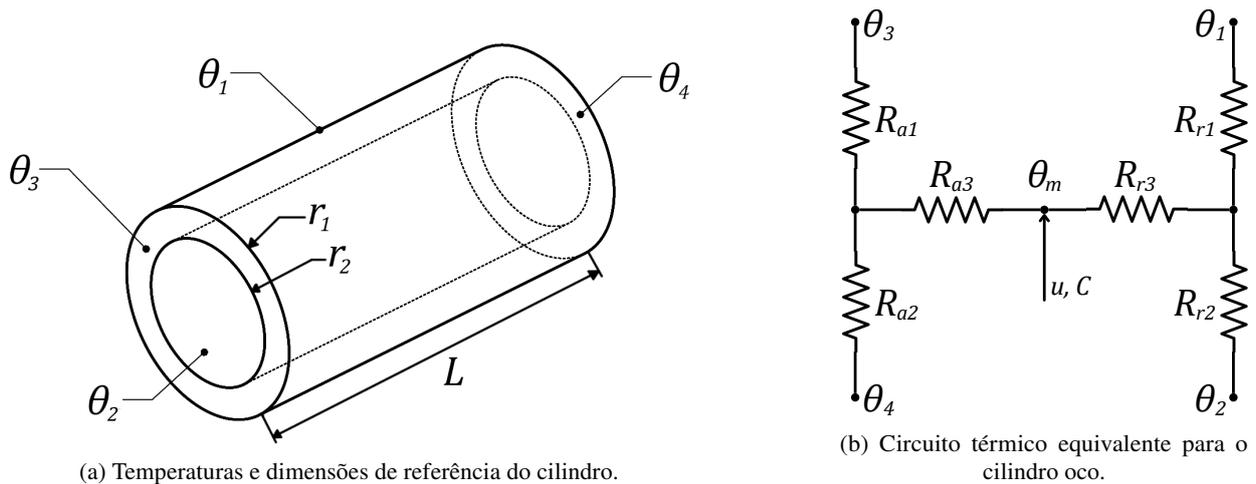


Figura 1: Circuito térmico equivalente do cilindro, com suas temperaturas ilustradas.

### 2.12 Modelo térmico de segmento de arco cilíndrico

Nem todos os componentes de um MRV podem ser descritos com precisão como cilindros. Os polos do estator e do rotor, por exemplo, são melhor modelados como segmentos de arco cilíndricos (como o exibido na Figura 2a). Adaptando um modelo térmico cúbico e o modelo cilíndrico previamente descrito, é possível obter o circuito térmico equivalente ilustrado na Figura 2. As equações das resistências térmicas desse circuito podem ser encontradas em [6].

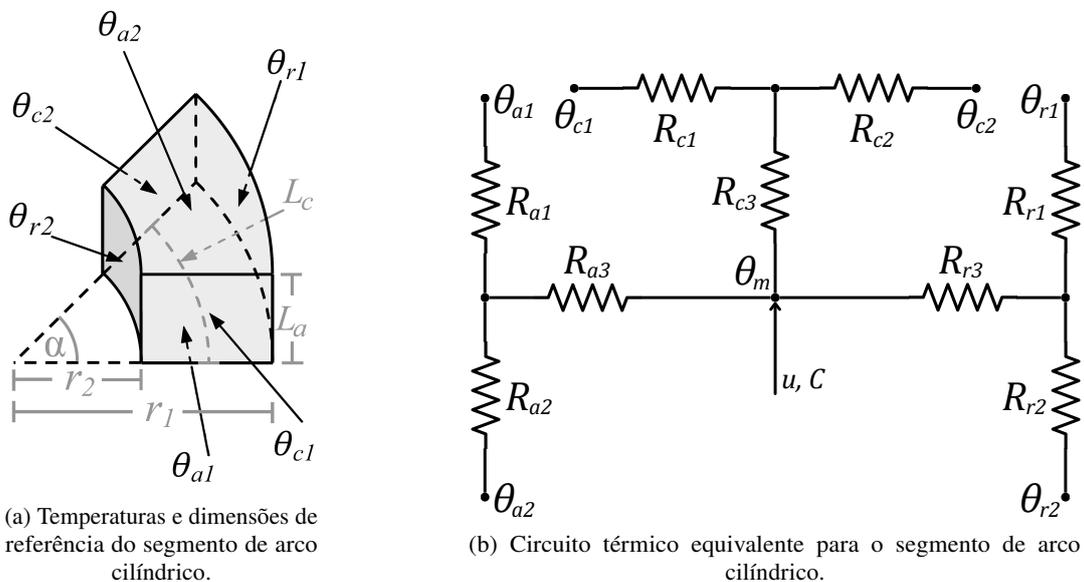


Figura 2: Circuito térmico equivalente do segmento de arco cilíndrico, com suas temperaturas ilustradas.

### 2.13 Adaptações nos circuitos térmicos

Devido às resistências negativas ao redor do nó central em cada um dos circuitos térmicos apresentados anteriormente, simulações transientes apresentam comportamento altamente instável, com temperaturas crescendo exponencialmente. Para evitar esse problema, uma transformação  $Y - \Delta$  deve ser aplicada para remover o contato direto das resistências negativas com os nós centrais, o que estabiliza o circuito e permite análises transientes coerentes.

## 2.2 Transferência de calor por convecção

### 2.2.1 Regiões contidas pela carcaça

O movimento rotacional do rotor induz o fluxo de ar no espaço interno do motor, gerando transferência de calor convectiva significativa. Esse fenômeno foi investigado por diversos autores, que geralmente

propõem correlações empíricas para caracterizá-lo. Essas correlações normalmente expressam o coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  como uma função da velocidade média do ar  $v$ , muitas vezes aproximada pela velocidade linear da superfície mais externa do componente rotativo. Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são determinados empiricamente por ajuste de curva. O coeficiente de convecção  $h$  (dado por Equação (1)) pode ser convertido em uma resistência térmica utilizando Equação (2), em que  $A$  representa a área total de troca térmica.

$$h = k_1 \cdot (1 + k_2 \cdot v^{k_3}) \quad (1)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2)$$

## 2.22 Convecção no entreferro

Como os polos do rotor e do estator estão muito mais próximos entre si do que de qualquer outro componente que troque calor por convecção, outro método de modelagem da convecção no entreferro se faz necessário. Uma formulação adequada para essa convecção em máquinas de entreferro pequeno com rotores ranhurados é dada por Equações (3) e (4) [5].

$$h = \frac{2.2 \cdot k_{air}}{l_g} \quad N_{Ta} \leq 41 \quad (3)$$

$$h = \frac{0.23 \cdot N_{Ta}^{0.63} \cdot N_{Pr}^{0.27} \cdot k_{air}}{l_g} \quad 41 < N_{Ta} \leq 100 \quad (4)$$

Em que os números adimensionais  $N_{Ta} = N_{Re} \cdot \sqrt{\frac{l_g}{R_{r,1}}}$  e  $N_{Pr} = \frac{\mu_{air} \cdot c_{p,air}}{k_{air}}$  representam, respectivamente, os números de Taylor e de Prandtl.  $l_g$  é a altura do entreferro,  $R_{r,1}$  é o diâmetro externo dos polos do rotor, e  $\mu_{air}$ ,  $c_{p,air}$  e  $k_{air}$  representam, respectivamente, a viscosidade dinâmica, o calor específico e a condutividade térmica do ar.

## 2.23 Convecção na jaqueta d'água

Por fim, a última transferência de calor por convecção que deve ser considerada é aquela dissipada pelo sistema de resfriamento através da jaqueta d'água. Como o fluido de resfriamento percorre um tubo longo e fechado, a formulação apropriada para o coeficiente convectivo médio (e, conseqüentemente, para a resistência térmica equivalente) é dada pelas correlações de Colburn, que podem ser encontradas em [7].

## 2.3 Circuito térmico final por parâmetros concentrados

Com as transferências de calor por condução e convecção devidamente formuladas, é possível combinar os modelos anteriormente descritos em um circuito térmico (ilustrado na Figura 3) que descreve com precisão o comportamento térmico completo do MRV.

## 3. RESULTADOS

Foram realizadas análises em regime permanente com o modelo, cujos resultados foram comparados com aqueles apresentados pelo Ansys Motor-CAD, um software padrão da indústria para o projeto de motores elétricos. Ao modelar um MRV 16/12, os principais pontos de interesse do sistema apresentaram resultados muito semelhantes tanto no Motor-CAD quanto no modelo proposto, conforme mostrado na Tabela I. Ambas as simulações foram configuradas com as mesmas perdas térmicas e uma temperatura de entrada da água de 60 °C.

Adicionalmente, como mostrado na Figura 4, o modelo proposto também permite análise transiente — uma funcionalidade que a maioria dos modelos disponíveis na literatura não apresenta. Além disso, a apresentação final desta pesquisa conterà uma comparação mais detalhada com os resultados do Motor-CAD, apresentando a temperatura em todos os componentes relevantes do motor.

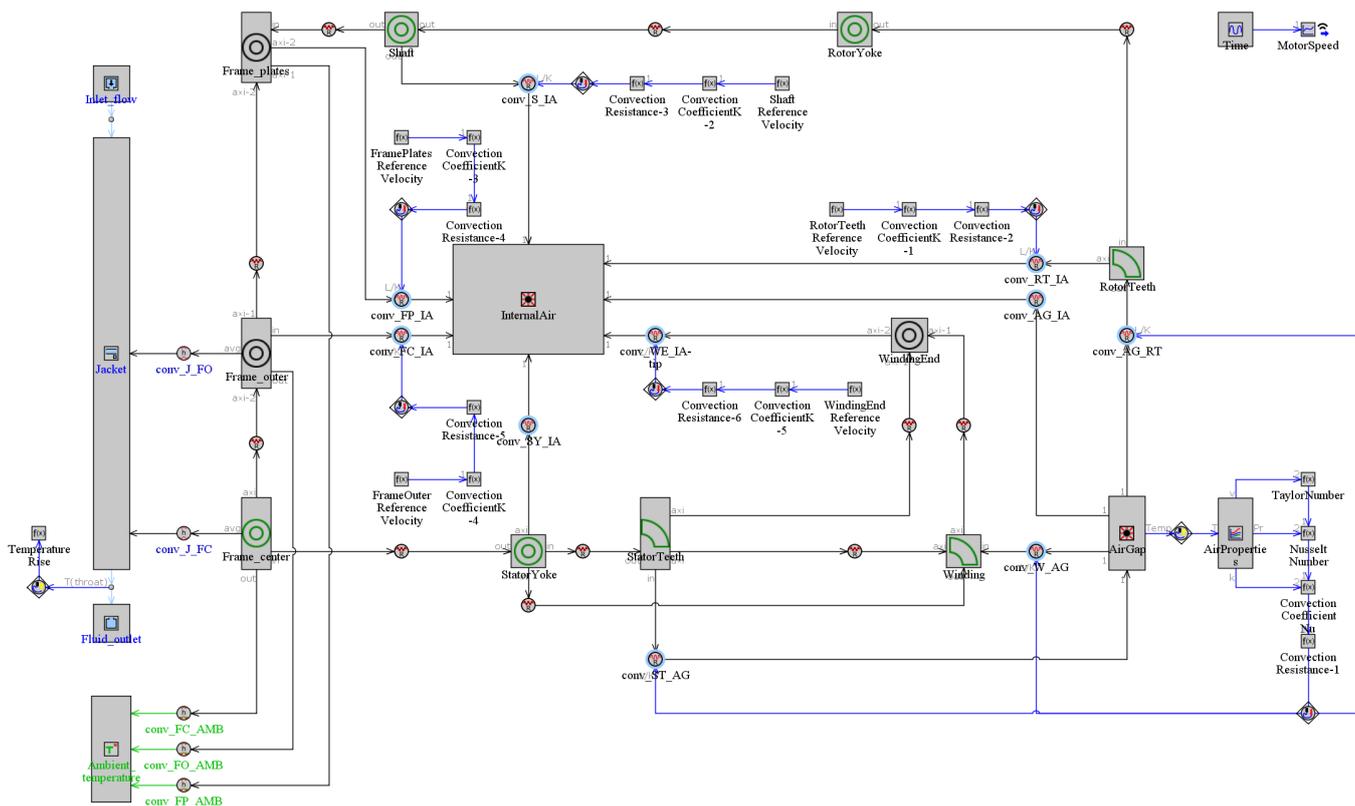


Figura 3: Circuito térmico final, desenvolvido a partir da combinação dos modelos térmicos previamente descritos.

Tabela I. Temperaturas em diferentes pontos de interesse dentro do motor e do sistema de resfriamento.

Ponto de interesse	Motor-CAD	Modelo proposto
Carcaça	61,9 °C	61,9 °C
Temperatura de saída da água	61,9 °C	61,9 °C
Extremidade dos enrolamentos	101,1 °C	100,9 °C

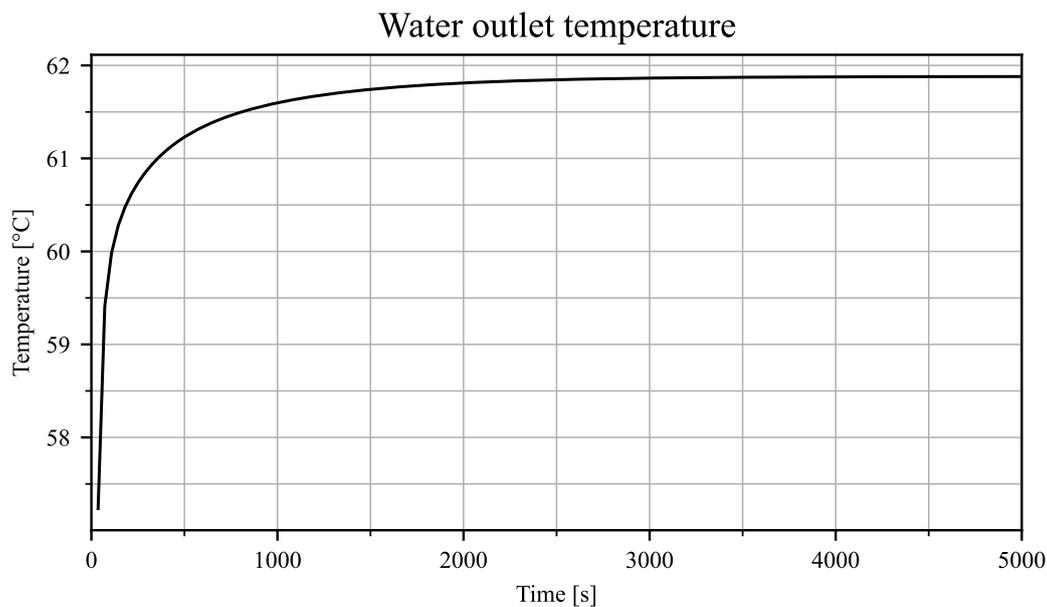


Figura 4: Temperatura de saída da água x tempo.

#### 4. CONCLUSÕES e TRABALHOS FUTUROS

Conclui-se, a partir dos resultados (que mostram uma diferença de apenas 0,2 °C na temperatura da extremidade do enrolamento em relação ao Motor-CAD), que o modelo proposto apresenta resultados precisos para a previsão de temperatura em motores de relutância comutada. Este novo modelo combina conhecimentos desenvolvidos por diversos autores em uma formulação adequada para análise transiente, além de permitir futuros desenvolvimentos para integração com outros componentes dissipadores de calor em um veículo elétrico.

A versão completa do artigo detalhará como cada modelo de transferência de calor por condução foi construído (explicando, por exemplo, adaptações feitas a partir da literatura para permitir análises transientes) e como cada componente do motor foi classificado dentro desses modelos. Além disso, as correlações de transferência de calor por convecção escolhidas serão apresentadas e discutidas. Por fim, espera-se comparar as temperaturas de saída da água com resultados obtidos em testes experimentais.

#### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] IPCC, “Climate change 2023: Synthesis report.” Geneva, Suíça, Jul. 2023, contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [2] IEA, “Transport – topics,” 2024, acesso em: 2025-04-18. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- [3] IEC, “Iec 60034-30-1:2014,” 2014. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/136>
- [4] P. H. Mellor, “Improvements in the efficiency and thermal ageing of single and parallel machine drives,” Ph.D. dissertation, University of Liverpool, december 1983. [Online]. Available: <https://livrepository.liverpool.ac.uk/3175975/1/277791.pdf>
- [5] P. H. Mellor, D. Roberts, and D. R. Turner, “Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design,” *IEE Proc.*, vol. 138, no. 5, p. 205, 1991.
- [6] N. Simpson, R. Wrobel, and P. H. Mellor, “A general arc-segment element for three-dimensional thermal modeling,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 265 – 268, 2014, cited by: 37. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6749134>
- [7] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. John Wiley & Sons, 2007.