

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE QUALITATIVA DA CONDUÇÃO AXIAL EM SISTEMAS DE ACUMULAÇÃO DE  
ENERGIA TÉRMICA SENSÍVEL COM COMPORTAMENTO PERIÓDICO

por

Vítor Valentim Becker

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 25 junho 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE QUALITATIVA DA CONDUÇÃO AXIAL EM SISTEMAS DE ACUMULAÇÃO DE  
ENERGIA TÉRMICA SENSÍVEL COM COMPORTAMENTO PERIÓDICO

por

Vítor Valentim Becker

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Dr. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Volnei Borges

Porto Alegre, 25 de junho de 2015.

Becker, V.V. **Análise qualitativa da condução axial em sistemas de acumulação de energia térmica sensível com comportamento periódico**. 2015. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **RESUMO**

Os sistemas de acumulação de energia podem ser classificados da seguinte maneira: sistemas de acumulação de calor sensível, calor latente ou químico. Neste trabalho, o objeto de estudo é um sistema de acumulação de calor sensível, com comportamento periódico, que utiliza um meio sólido para acumulação de energia térmica, sem que haja troca de fase. Nesse tipo de sistema, as propriedades térmicas e geométricas do meio são de grande importância. Problemas dessa natureza costumam ser avaliados via Modelo da Capacitância Global, MCG, o qual oferece um tratamento simplificado da condução transiente, desprezando-se gradientes de temperatura no interior do sólido. Visando avaliar qualitativamente os efeitos axiais da transferência de calor, mais precisamente se os mesmos podem ser desconsiderados, compara-se os resultados obtidos pelo MCG com os resultados gerados pelo software comercial COMSOL<sup>®</sup>, avaliando-se quatro materiais distintos. A literatura especializada dita que os parâmetros-chave na avaliação desse tipo de sistema são energia trocada pelo sólido acumulador e a temperatura do fluido de saída. Para a energia trocada, o desvio relativo não ultrapassou 1,5% para todos os materiais testados. No caso da temperatura, o desvio absoluto tem valores inferiores a 2K para o granito e inferiores a 1K para os demais materiais. Os valores dos desvios entre os resultados obtidos por métodos diferentes evidenciam a concordância entre os mesmos. Esta avaliação contribui para reforçar a aplicação deste modelo simples, MCG, para casos envolvendo esse tipo de acumulador. Além disso, a utilização de modelos simplificados elimina a necessidade de se calcular os gradientes de temperatura ao longo do sólido, mantendo os parâmetros físicos importantes para a resolução do problema, diminuindo a necessidade de recursos computacionais significativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistema de acumulação de energia térmica sensível; modelo da capacitância global; condução axial em sistemas de acumulação; sistemas de acumulação de energia com comportamento periódico.

Becker, V.V. **Qualitative analysis for axial conduction on sensible thermal energy storage systems with periodic behavior**. 2015. 24 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **ABSTRACT**

Energy storage systems are categorized as thermal sensible, thermal latent or chemical storage systems. In this paper, the object of study is a sensible thermal energy storage system with periodic behavior, which uses a solid medium to storage thermal energy without phase change. The thermal and geometric medium properties play a central role in this kind of system. Problems of this nature are usually evaluated by the lumped capacitance model, which offers a simplified treatment of the transient conduction, disregarding temperature gradients on the solid interior. In this sense, the principal goal is to analyze the heat transfer axial effects, identifying situations that it can be disregarded. So, using four distinct materials, the results obtained from the lumped capacitance model are compared to results generated by the commercial software COMSOL<sup>®</sup>. The state of art dictates that the key parameters for evaluating this kind of system are the storage material exchanged energy and the fluid outlet temperature. In terms of exchanged energy, the relative deviation does not exceed 1.5% for all tested materials. Similarly for the temperature, the absolute deviation has absolute values bellow 2K for granite and 1K for other materials. The values obtained for deviations infer the concordance between the different methods. This analysis contributes to reinforce the application of the simplified method - the lumped capacitance model - to situations involving this kind of storage system. Furthermore, the simplified method eliminates the calculation of the temperature gradients inside the solid, reducing the computational time, while keeping the important system physical parameters.

**KEYWORDS:** sensible thermal energy storage systems; lumped capacitance model; axial conduction on storage systems; energy storage systems with periodic behavior.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>2</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>2</b>
<b>4. CASO ESTUDADO – O Modelo semi-analítico baseado no MCG</b>	<b>2</b>
<b>5. METODOLOGIA – Modelos de seção única e <math>n</math> seções</b>	<b>4</b>
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>7</b>
6.1. Independência de Malha	7
6.2. Comparação entre modelos - semi-analítico baseado no MCG e modelo numérico	9
6.3. Avaliação da condução axial	10
<b>7. CONCLUSÕES</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>14</b>
<b>Apêndice A – Resultados obtidos para os outros materiais simulados</b>	<b>16</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de acumulação de energia podem ser classificados da seguinte maneira: sistemas de acumulação de calor sensível, calor latente ou químico (Bal *et al.*, 2010). Um exemplo clássico é a bateria de chumbo-ácido, utilizada em automóveis e sistemas fotovoltaicos isolados, convertendo a energia química armazenada em energia elétrica, e vice-versa. Outro exemplo característico está associado à energia solar, cuja oferta é intermitente por natureza. Seu valor total disponível é sazonal, dependendo das condições meteorológicas do local. Assim, o armazenamento de energia é essencial para qualquer sistema que dependa, em grande parte, da energia solar. A inserção de acumuladores de energia ajusta a defasagem temporal existente entre a demanda e a oferta, melhorando assim o funcionamento do sistema. Exemplos de materiais utilizados para este fim são pedras e concreto.

Neste trabalho o objeto de estudo é um sistema de acumulação de calor sensível que utiliza um meio sólido para acumulação de energia térmica, sem que haja troca de fase. Nesse tipo de sistema, as propriedades térmicas e geométricas do meio são de grande importância. A dinâmica de acumulação térmica e, conseqüentemente, o comportamento da temperatura de saída do acumulador, são fortemente dependentes dessas propriedades.

Esta dinâmica de acumulação térmica pode ser avaliada utilizando-se modelos analíticos, semi-analíticos ou numéricos. O modelo analítico comumente utilizado é o Modelo da Capacitância Global, MCG, o qual tem como princípio básico desprezar os gradientes de temperatura no interior do sólido. Ou seja, baseia-se na hipótese de que a temperatura no sólido é uniforme no espaço em qualquer instante de tempo durante um processo transiente. Entretanto, para que o MCG possa ser utilizado, é necessário garantir que o número de Biot, um número adimensional que avalia a razão entre a resistência térmica por condução e a resistência térmica por convecção, seja menor que 0,1. Isto é, a resistência à condução no interior do sólido é pequena em comparação à resistência à transferência de calor entre o sólido e sua vizinhança.

O princípio básico do MCG inviabiliza a avaliação do problema via equação do calor, sendo necessária a formulação de um balanço global de energia no sólido para determinar a resposta transiente da temperatura. Contudo, para inúmeras aplicações, o MCG garante bons resultados e, conseqüentemente, boas previsões de comportamento. Desta forma, observa-se na literatura especializada a utilização do MCG, com algumas variações, para a avaliação de sistemas de acumulação de energia térmica sensível. Para garantir Biot menor que 0,1, costuma-se dividir o sólido (material acumulador) em várias seções, conforme foi feito por Sragovich, 1989 e Andriotty, 2014. Quanto maior for o número de seções utilizadas, menor será o comprimento característico (calculado para cada seção) e, conseqüentemente, menor será o número de Biot, viabilizando a utilização do MCG.

Contudo, esta divisão do sólido em seções pode alterar o comportamento da transferência de calor no sistema. Ou seja, a divisão implica a existência de resistências entre as interfaces, que poderiam gerar gradientes de temperatura que não podem ser desprezados, inviabilizando a aplicação do MCG. Portanto, faz-se necessário avaliar até que ponto pode-se utilizar esta divisão do sólido garantindo que o princípio básico do MCG não será violado, ou seja, que os gradientes no interior do sólido continuarão sendo desprezíveis.

O estudo da avaliação qualitativa da condução axial em sistemas de acumulação de energia térmica sensível do presente trabalho será realizado tomando-se como exemplo o caso 1 avaliado por Andriotty, 2014. Para isso, utilizar-se-á o *software* comercial COMSOL<sup>®</sup>. Os resultados gerados a partir da simulação numérica do problema serão comparados com os resultados obtidos através do modelo semi-analítico proposto em Andriotty, 2014, o qual utiliza o MCG. Para tanto, serão simuladas placas planas (material acumulador) considerando-se seu comprimento total, e depois considerando-se que as mesmas são formadas por um conjunto de pequenas placas, ou seja, um conjunto de  $n$  seções (configuração utilizada no método semi-analítico). Desta forma, pode-se verificar se os gradientes de temperatura que surgem dessa divisão podem ser desprezados.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, para um sistema de acumulação de energia térmica sensível, se os efeitos axiais da transferência de calor podem ser desconsiderados. Esta avaliação contribuirá para reforçar a aplicação deste modelo simples, MCG, para casos envolvendo esse tipo de acumulador, bem como para corroborar o método semi-analítico utilizado por Andriotty, 2014. Além disso, a utilização de modelos simplificados elimina a necessidade de se calcular os gradientes de temperatura ao longo do sólido, mantendo os parâmetros físicos importantes para a resolução do problema, diminuindo a necessidade de recursos computacionais significativos.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sragovich, 1989, fez uso da discretização do material em seções para poder utilizar o MCG no desenvolvimento de seu método para calcular e projetar sistemas de acumulação térmica sensível, para altas temperaturas. Para tanto, o material deveria ser dividido em seções que respeitassem a condição de que o número de Biot seja menor que 0,1. O sistema de acumulação avaliado consistia em tijolos refratários, vazados por tubos circulares, cuja função era manter a temperatura de um determinado processo químico em um valor mínimo aceitável, durante períodos de baixa intensidade solar. Os resultados permitiram prever as características dos sistemas de armazenamento de energia térmica sensível e aperfeiçoar o projeto em função de parâmetros operacionais como a geometria e as características térmicas do sistema.

Andriotty, 2014, em seu estudo de otimização de estruturas de acumulação de calor sensível, que operam com fontes de energia intermitentes, utilizou um método semi-analítico, baseado no MCG, para descrever o comportamento transiente do sólido e analisar a transferência de calor entre este e um fluido. Seu método consistia em dividir o material em  $n$  seções, aplicando a cada uma o MCG. Com a divisão, diminuiu-se o comprimento característico, e conseqüentemente, garante-se um valor menor que 0,1. Para a otimização, foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada: a geometria, as propriedades termofísicas do material acumulador e a vazão do fluido de trabalho. Como parâmetro comparativo, foi usada a taxa de energia de saída do sistema. A análise foi realizada com o *software Engineering Equation Solver*, EES, utilizando um algoritmo genético para a otimização. Os resultados demonstraram que o aumento dos parâmetros de entrada implicava o aumento da diferença relativa entre a taxa de energia de saída obtida e a taxa almejada.

Finalmente, Jian, *et al.*, 2015, fazem um estudo sobre projeto e otimização de módulos de armazenamento para aplicações em usinas de energia solar térmica (CSP), propondo um modelo analítico baseado no método da transformada de Laplace e da inversa da transformada. Nesse estudo, foi enfatizado que os parâmetros-chave para sistemas de acumulação são a energia trocada pelo módulo de armazenamento (sólido) e a temperatura do fluido de saída. Isto é, seriam eles quem definiriam os requisitos de sistema que devem ser cumpridos para satisfazer a premissa da otimização. Uma de suas premissas básicas foi negligenciar a condução axial, mais especificamente o gradiente de temperatura no sólido na direção axial. Segundo o autor, o gradiente nessa direção é significativamente inferior quando comparado ao gradiente na direção radial.

## 4. CASO ESTUDADO – O Modelo semi-analítico baseado no MCG

O caso estudado é proposto por Andriotty, 2014. Resumidamente, trata-se em um sistema composto por uma câmara retangular contendo placas planas (material acumulador de energia térmica sensível) dispostas em paralelo, entre as quais flui ar. Essa corrente de ar está sujeita a uma fonte intermitente de energia. Assim, a temperatura de entrada do fluido,  $T_{f0,t}$  tem comportamento periódico descrito por (Andriotty, 2014)

$$T_{f,0,t} = T_{f,0,\min} + \left[ 1 + \operatorname{sen}\left(\frac{\pi t}{\beta}\right) \right] \left( \frac{T_{f,0,\max} - T_{f,0,\min}}{2} \right) \quad (4.1)$$

na qual  $T_{f,0,\min}$  e  $T_{f,0,\max}$  são as temperaturas mínima e máxima do fluido de entrada, em K, respectivamente, e  $\beta$  é o tempo de meio período, em segundos. A temperatura inicial,  $T_i$ , do sistema, que é composto do sólido de acumulação e do fluido que se encontra previamente no sistema, é igual a 320K.

Andriotty, 2014, modelou o problema de acumulação em placas conforme mostra a Figura 4.1. Aplicando-se o balanço de energia no volume de controle apresentado, chega-se a

$$c_{p,f} \dot{m} T_{f,ent} - c_{p,f} \dot{m} T_{f,sai} + h dA_s (T_s - T_f) = c_{p,f} \rho_f V \frac{dT_f}{dt} \quad (4.2)$$

na qual  $c_{p,f}$  é o calor específico do fluido, em J/(kgK),  $\rho_f$  é sua massa específica, em kg/m<sup>3</sup>,  $\dot{m}$  é sua vazão mássica, em kg/s,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor, em W/(m<sup>2</sup>K),  $dA_s$  é o diferencial da área superficial de troca térmica, em m<sup>2</sup>,  $T_{f,ent}$  e  $T_{f,sai}$  são, respectivamente, a temperatura de entrada e a temperatura de saída do fluido no volume de controle,  $T_s$  é a temperatura do sólido, em K, e  $V$  é o volume de controle, em m<sup>3</sup>.

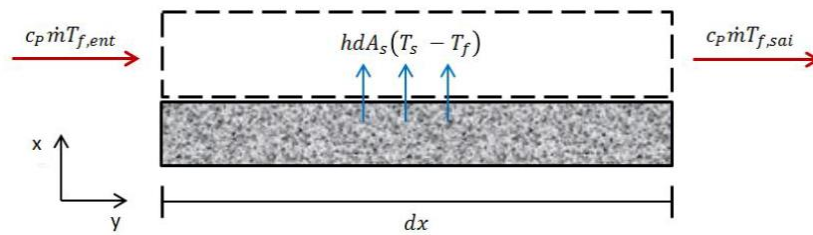


Figura 4.1 - Balanço de energia no fluido de trabalho – volume de controle. Fonte: adaptado de Andriotty, 2014.

Para determinar o valor da temperatura do sólido, Andriotty, 2014, realizou um balanço de energia com um volume de controle ao redor do material de acumulação, Figura 4.2. O balanço é dado por

$$-hA_s (T_s - T_f) = c_{p,s} \rho_s V_s \frac{dT_s}{dt} \quad (4.3)$$

na qual  $c_{p,s}$  é o calor específico do sólido, em J/(kgK),  $\rho_s$  é sua massa específica, em kg/m<sup>3</sup>,  $V_s$  é o volume do sólido, em m<sup>3</sup>, e  $t$  é o tempo, em s.

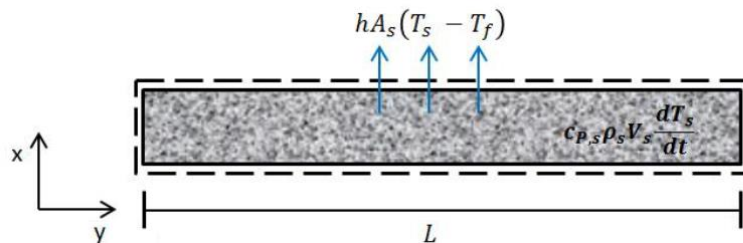


Figura 4.2 - Balanço de energia no sólido (acumulador) – volume de controle. Fonte: adaptado Andriotty, 2014.

Conforme mencionado anteriormente, de acordo com Incropera *et al.*, 2008, uma limitação do modelo da capacitância global é que o número de Biot, dado pela Equação 4.4, deve ser menor ou igual a 0,1. Para esses valores de Biot os desvios causados pelo uso do



modelo são inferiores a 5% (Incropera *et al.*, 2008). Este número adimensional, característico da condução transiente, é dado por

$$Bi = \frac{hL_c}{k_s} \quad (4.4)$$

na qual  $L_c$  é o comprimento característico do sólido, em m, e  $k_s$  é a condutividade térmica do sólido em W/(mK). Andriotty, 2014, considerou o comprimento característico como sendo a distância entre os pontos de maior diferença de temperatura presentes no sólido. Com isso, visava compensar a variação do fluxo de calor ao longo do comprimento da placa plana sem deixar de satisfazer as condições necessárias para utilização do MCG. Assim, o comprimento característico definido está representado abaixo, Figura 4.3.

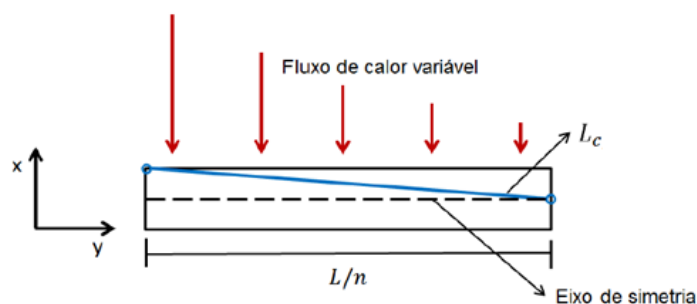


Figura 4.3 - Comprimento característico para placa plana utilizada como sólido de acumulação. Fonte: adaptado de Andriotty, 2014.

Além disso, o MCG considera a temperatura do sólido uniforme ao longo de todo o volume, ignorando os gradientes de temperatura internos e, conseqüentemente, resultando em imprecisões no cálculo. Para contornar esse problema, Sragovich, 1989, e Andriotty, 2014, dividiram o material de acumulação analisado em diversos elementos, aplicando o modelo a cada elemento, Figura 4.4. Quanto mais elementos forem utilizados, menor será o desvio devido à utilização do MCG, pois menor será o número de Biot de cada seção, resultando em menor variação da temperatura ao longo de cada seção (Sragovich, 1989). Maiores detalhes acerca do caso estudado podem ser encontrados em Andriotty, 2014.

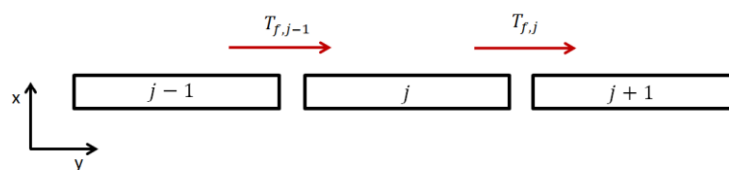


Figura 4.4 – Discretização do sólido de acumulação em seções. Fonte: adaptado de Andriotty, 2014.

## 5. METODOLOGIA – Modelos de seção única e $n$ seções

No presente trabalho utiliza-se o *software* comercial COMSOL<sup>®</sup> para simular o sistema de acumulação de energia térmica sensível. Busca-se, com isso, obter resultados que permitam a avaliação dos efeitos axiais da condução.

As simulações são feitas em duas dimensões,  $x$  e  $y$ , conforme Figura 5.1. A mesma figura apresenta a geometria, bem como as condições de contorno utilizadas nas simulações. Salienta-se que foram adotadas condições de simetria em ambos lados. Maiores detalhes são

apresentados em Andriotty, 2014. A representação abaixo apresenta o modelo denominado modelo de  $n$  seções (utilizado por Sragovich, 1989 e por Andriotty, 2014), Figuras 5.1a e 5.1b, e o modelo de seção única, Figura 5.1c.

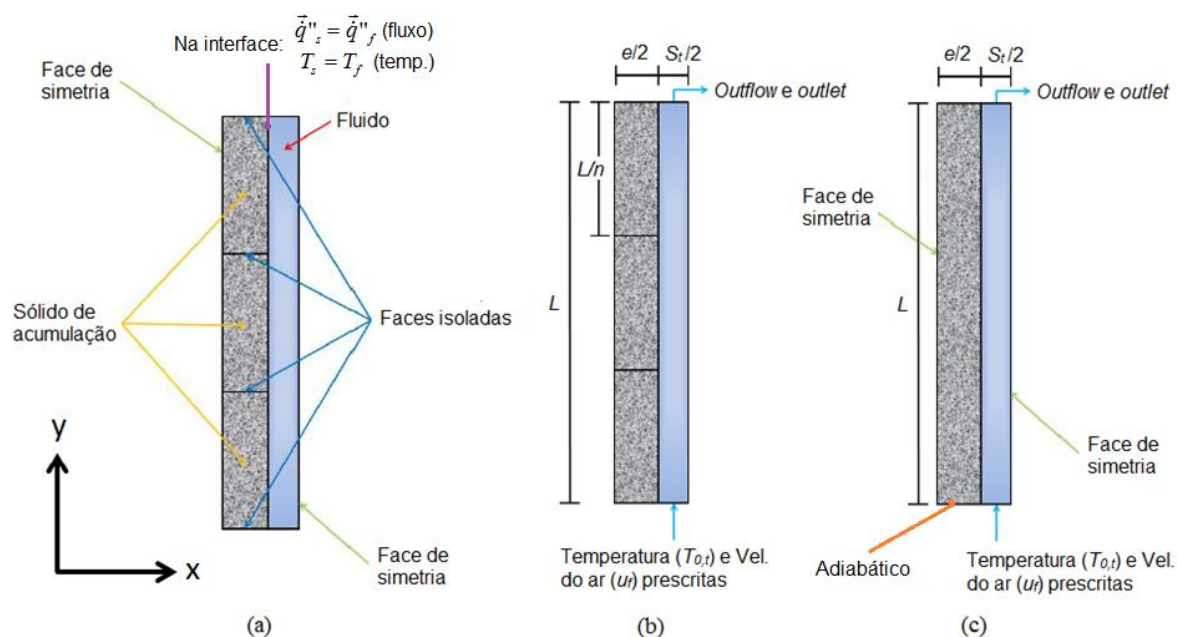


Figura 5.1 – Configurações e parâmetros geométricos com respectivas condições de contorno e condição de simetria. (a) e (b) Modelo de  $n$  seções e (c) modelo de seção única. Fonte: adaptado de Andriotty, 2014.

Para as placas apresentadas na Figura 5.1 acima, são utilizados, para fins de comparação, os seguintes materiais: aço AISI304, alumínio puro, granito e nitrato de silicone. O número de seções, as propriedades termofísicas, o número de Biot (Eq. 4.4) e outros parâmetros, relativos ao sólido (material de acumulação de energia térmica) são apresentados na Tabela 5.1. Salienta-se que, de acordo com Andriotty, 2014, o número de Biot do granito ficou acima de 0,1, decorrente de uma limitação do *software* utilizado, que não permitiu a divisão por um número maior de seções. As propriedades do fluido (ar) são apresentadas na Tabela 5.2.

Primeiramente, realiza-se uma análise de independência de malha, tanto do refino do tamanho de elemento de malha, quanto do refino da variável temporal, para a qual o *software* utiliza o parâmetro adimensional tolerância relativa,  $RT$ . Este, consiste na medida do desvio relativo para o valor de cada variável da solução, controlando o número de dígitos que não variam a cada nova iteração (COMSOL, 2012). Por exemplo, uma  $RT$  igual  $10^{-3}$  corresponde a uma precisão de 0,1%. A tolerância relativa é utilizada em cada iteração para todas as variáveis dependentes, em todas as equações. Todas as simulações realizadas no presente trabalho possuem passo temporal de 40 segundos e são avaliadas em um intervalo de tempo de 0 a 80.000 segundos, ou 22,25 horas.

Para a análise de independência de malha, utiliza-se um caso simplificado para o sistema de acumulação, isto é, placas de Aço AISI 304 com apenas uma seção. Assume-se que a temperatura inicial  $T_i$  de todo o sistema é igual a 300K e a temperatura de entrada do ar,  $T_{0,i}$ , é constante, igual a 400K. Por simplicidade, toma-se a largura das placas como sendo igual a uma unidade de comprimento. Os demais parâmetros, dimensões geométricas e propriedades do material acumulador e do fluido são mantidos. Os resultados da análise de independência de malha são apresentados na Seção 6.1.

Tabela 5.1 – Propriedades e parâmetros dos materiais do sólido de acumulação.  
Fonte: adaptado de Andriotty, 2014.

Parâmetros	Aço AISI304	Alumínio puro	Granito	Nitrato de silicone
Massa específica $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7900	2702	2630	2400
Calor específico $c_p$ [J/(kgK)]	477	903	775	691
Condutividade térmica $k$ [W/(mK)]	14,90	237,00	2,79	16,00
Espessura das placas $e$ [m]	0,0299	0,040	0,040	0,0463
Distância entre placas $S_t$ [m]	0,01	0,01	0,01	0,0116
Nº de placas [-]	12,54	10,00	9,837	8,642
Nº de seções [-]	3	3	17	3
Velocidade do ar $u_f$ [m/s]	0,5982	0,75	0,75	0,75
Número de Biot [-]	0,081	0,005	0,118	0,073

Tabela 5.2– Propriedades do fluido - ar. Fonte: adaptado de Incropera *et al.*, 2008.

Massa específica $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,103
Calor específica $c_p$ [J/(kgK)]	1008
Condutividade térmica $k$ [W/(mK)]	2,785E-2
Viscosidade dinâmica $\mu$ [kg/(ms)]	1,949E-5
Número de Prandtl [-]	0,705

Parte-se, então, para oito simulações (todas pelo *software* comercial COMSOL<sup>®</sup>), isto é, duas para cada material, com propriedades e parâmetros listados na Tabela 5.1, sendo uma considerando-se a placa inteira (modelo de seção única – Fig. 5.1c) e outra com a placa dividida em  $n$  seções (Fig 5.1b). Conforme apresentado anteriormente,  $T_{o,t}$  possui comportamento senoidal (Eq. 4.1) e o fluido possui as propriedades descritas na Tabela 5.2. A geometria e as condições de contorno são as definidas na Figura 5.1.

A simulação realizada pelo *software* comercial COMSOL<sup>®</sup> faz uso de equações fundamentais para obter os resultados associados aos fenômenos físicos modelados. As equações utilizadas podem ser visualizadas pelo usuário. Para o caso estudado, ou seja, escoamento não-isotérmico e transferência de calor envolvendo convecção entre fluido e sólido e condução no sólido, o *software* utiliza as Equações 5.1 a 5.4, apresentadas a seguir.

Equação da quantidade de movimento

$$\rho_f \frac{\partial \vec{u}_f}{\partial t} + \rho_f (\vec{u}_f \cdot \nabla) \vec{u}_f = -\nabla p_f + \mu_f (\nabla^2 \vec{u}_f) \quad (5.1)$$

Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (5.2)$$

Equação da condução do calor no fluido

$$\rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} \vec{u}_f \cdot \nabla T_f = k_f \nabla^2 T_f \quad (5.3)$$

nas quais, para o fluido,  $\rho_f$  é a massa específica, em kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,f}$  é o calor específico, em J/(kgK),  $k_f$  é a condutividade térmica, em W/(mK),  $\mu_f$  é a viscosidade dinâmica, em kg/(ms),  $T_f$  é a temperatura, em K,  $\nabla p_f$  é o gradiente da pressão termodinâmica, em Pa,  $\vec{u}_f$  é o vetor velocidade do fluido, em m/s, e  $t$  é o tempo, em segundos.

Equação da condução do calor no sólido

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s \quad (5.4)$$

na qual, para o sólido,  $\rho_s$  é massa específica, em kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,s}$  é calor específico, em J/(kgK),  $k_s$  é condutividade térmica, em W/(mK),  $T_s$  é a temperatura, em K, e  $t$  é o tempo, em segundos.

Segundo Jian, *et al.*, 2015, os parâmetros-chave para sistemas de acumulação são a energia trocada pelo material de armazenamento (sólido),  $Q_{TROC}$ , e a temperatura do fluido de saída  $T_{f,sai}$ . O primeiro parâmetro é obtido através de

$$Q_{TROC} = \rho c_p V (T_{sol} - T_{ref}) \quad (5.5)$$

na qual  $T_{sol}$  é a temperatura do sólido, em K, e  $T_{ref}$  é a temperatura de referência, cujo valor é 290K (Andriotty, 2014). O outro parâmetro utilizado para a análise é obtido através de (Incropera *et al.*, 2008)

$$T_{f,sai} = \frac{\int_A \rho_f u c_{p,f} T_f dA}{\dot{m} c_{p,f}} \quad (5.6)$$

cujas variáveis, e suas respectivas unidades físicas, já foram explicitadas acima.

## 6. RESULTADOS

A análise e os resultados são abordados em três etapas. A primeira apresenta a análise de independência de malha, na qual são avaliados o refino do tamanho de elemento de malha e o parâmetro adimensional  $RT$ , referente à tolerância relativa da variável temporal. A segunda consiste na comparação dos resultados obtidos por Andriotty, 2014, com os resultados obtidos pelo software COMSOL®. A terceira parte compreende a avaliação qualitativa da condução axial. Para a segunda e terceira etapas, são avaliados quatro casos envolvendo diferentes materiais. As propriedades termofísicas, e demais parâmetros, encontram-se sumarizados na Tabela 5.1 da seção anterior.

### 6.1. Independência de Malha

A análise de independência de malha é feita utilizando-se dois parâmetros, o fluxo de calor entre o fluido e o sólido e a temperatura do fluido na saída, selecionados para fins de comparação. Para o refino do tamanho de elemento de malha, o *software* apresenta quatro possibilidades de refino, com números de volumes correspondentes apresentados na Tabela 6.1. A Figura 6.1, apresenta parte do domínio com a malha, dando ênfase à interface sólido-fluido, região na qual a malha foi refinada.

A evolução temporal dos dois parâmetros é mostrada na Figura 6.2. Observa-se que, tanto para o fluxo de calor como para a temperatura, esta evolução é semelhante para os quatro tipos de malhas utilizadas. Entretanto, os resultados obtidos com a malha *extrafine* evoluíram mais rapidamente. Não obstante, esta malha não apresenta o maior número de

volumes, Tabela 6.1, o que acarretaria maior tempo computacional. Assim, malha *extrafine* foi escolhida para todas as simulações.

Tabela 6.1. Tipo de malha e número de volumes correspondentes.

Tipo de malha	Nº de volumes
<i>Fine</i>	15163
<i>Finer</i>	47738
<i>Extrafine</i>	123787
<i>Extremely fine</i>	168811

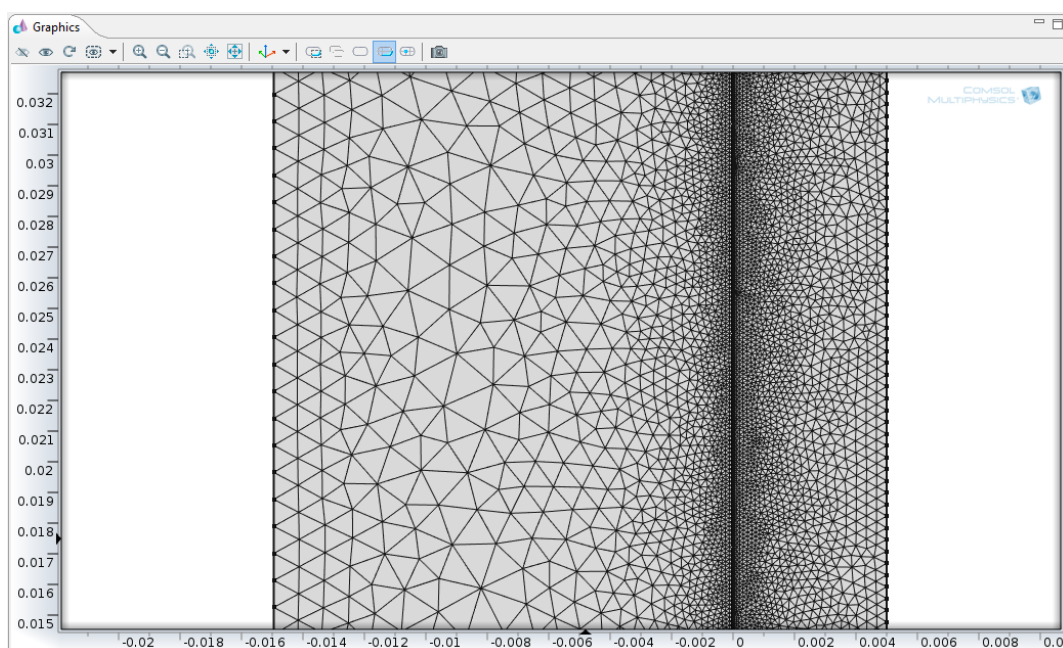


Figura 6.1. –Malha utilizada, enfatizando o refinamento na interface sólido-fluido.

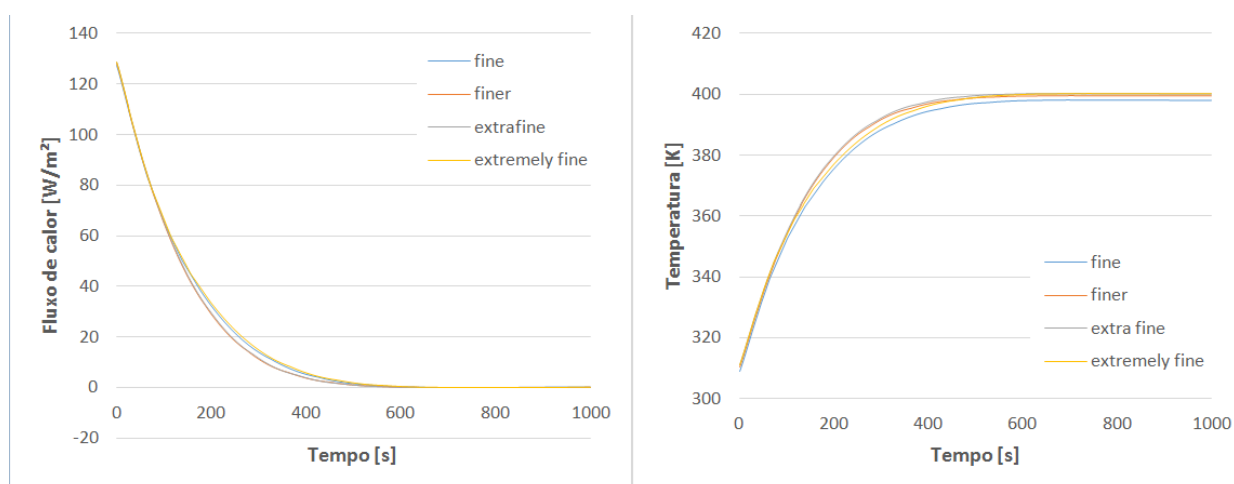


Figura 6.2 – Análise de independência de malha avaliando-se o fluxo de calor entre o fluido (ar) e o sólido e a temperatura do fluido na saída. Material: aço AISI304.

Parte-se então para avaliação do parâmetro adimensional  $RT$ , para o qual o *software* oferece a possibilidade de se escolher um determinado valor. Foram testados os seguintes valores: 0,01, 0,001 e 0,0001. A Figura 6.3 apresenta a evolução temporal para as variáveis fluxo de calor entre o fluido e o sólido e a temperatura do fluido na saída, utilizando cada um desses valores.

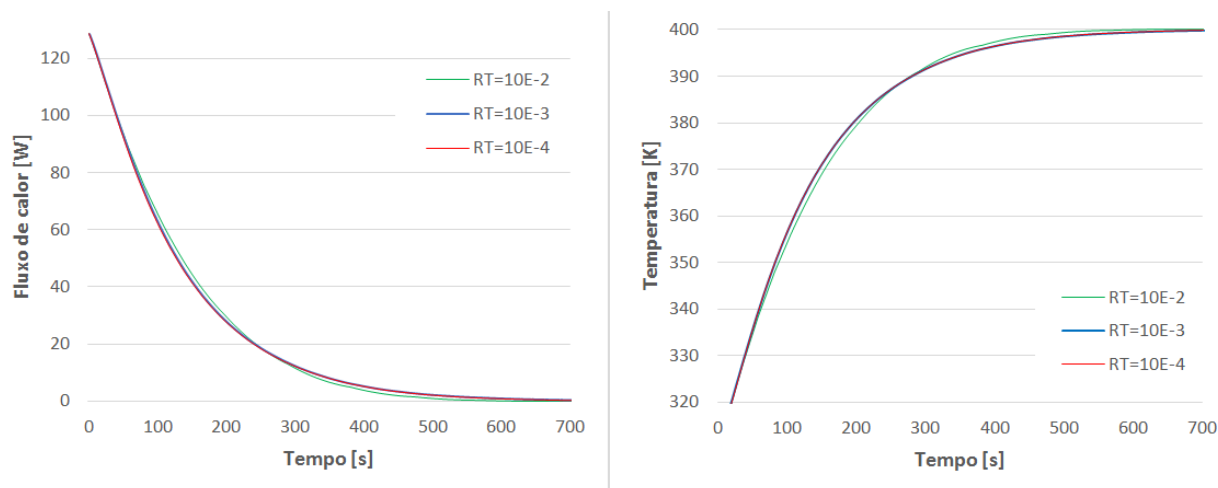


Figura 6.3 – Avaliação do parâmetro adimensional  $RT$ .

Observa-se que a evolução temporal é semelhante para todos os valores testados para  $RT$ , tanto para fluxo de calor quanto para temperatura. Opta-se, então, pela tolerância relativa  $RT = 0,001$ , por ser o valor intermediário, em termos de tempo computacional dispendido.

## 6.2. Comparação entre modelos - semi-analítico baseado no MCG e modelo numérico

Esta seção apresenta a comparação dos resultados obtidos por Andriotty, 2014, com os resultados obtidos pelo *software* COMSOL<sup>®</sup>. O objetivo é verificar a compatibilidade, e consequentemente possíveis desvios, entre o modelo semi-analítico e o modelo numérico, utilizando a placa dividida em  $n$  seções.

A Figura 6.4 abaixo apresenta a evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{TROC}$ . Os períodos de carga e descarga, para ambos os casos (MCG e simulação com COMSOL<sup>®</sup>), encontram-se em fase. Além disso, é possível observar a semelhança no comportamento desta evolução. Os desvios máximos e mínimos absolutos entre os modelos são de 1520J e 6,15J, respectivamente.

O mesmo comportamento pode ser observado quando se compara os resultados obtidos para a temperatura de saída do fluido,  $T_{f,sai}$ , Figura 6.5. Em ambos os métodos, têm-se valores próximos, cujos desvio máximo e desvio mínimo absolutos são de 1,698K e 0,003K, respectivamente. Para ambos os parâmetros, os comparativos dos demais casos (alumínio puro, granito e nitrato de silicone) encontram-se no Apêndice A, Figuras A.1 a A.6.

Da análise das Figuras 6.4 e 6.5 abaixo, pode-se inferir que o modelo simplificado, utilizado por Andriotty, 2014, gera resultados com pequenos desvios quando comparado ao modelo numérico, mostrando-se adequado para o objeto de estudo do presente trabalho. Uma vez verificada esta compatibilidade, parte-se para a avaliação da condução axial.

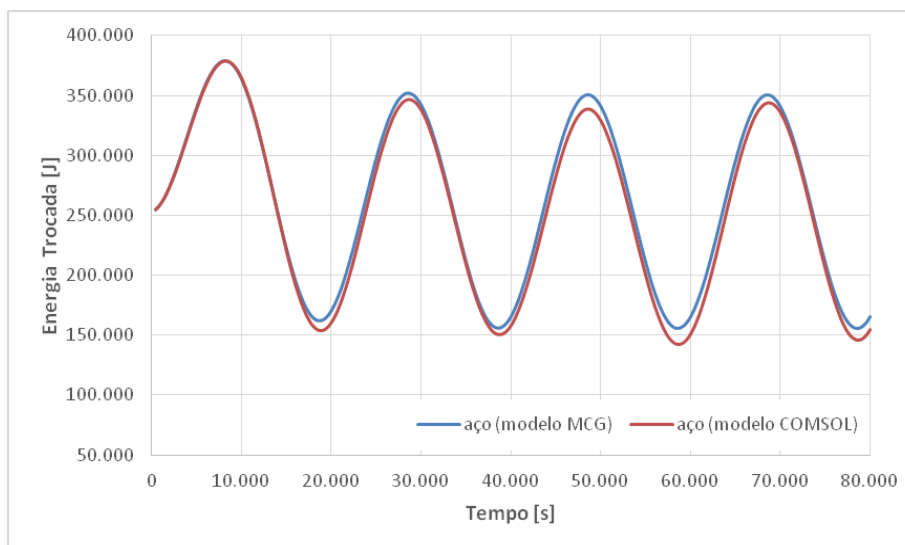


Figura 6.4 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{TROC}$ . Material: aço AISI304.

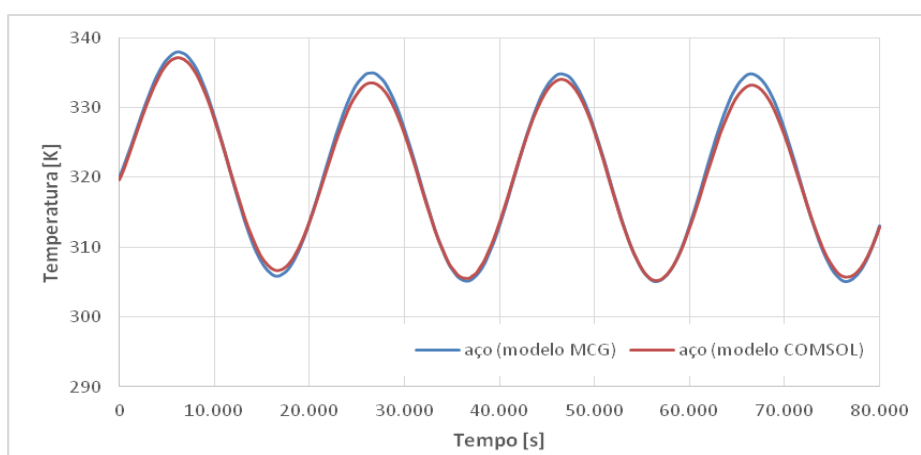


Figura 6.5 – Comportamento temperatura de saída do fluido,  $T_{f,sai}$ , ao longo do tempo. Material: aço AISI304.

### 6.3. Avaliação da condução axial

Nesta etapa, utilizando os mesmos parâmetros da subseção anterior, são avaliadas as simulações feitas para os modelos de seção única e de  $n$  seções, com vistas a avaliar a condução axial, através do *software* COMSOL®. Novamente, para fins de comparação, escolhe-se como material o aço. Entretanto, salienta-se que os resultados obtidos para os demais materiais encontram-se no Apêndice A, Figuras A.7 a A.12.

O primeiro parâmetro analisado, a energia trocada pelo sólido,  $Q_{TROC}$ , é apresentado na Figura 6.6. Observa-se concordância entre os modelos, porém podem ser observados desvios em instantes próximos a  $5 \times 10^4$  e  $6 \times 10^4$  segundos.

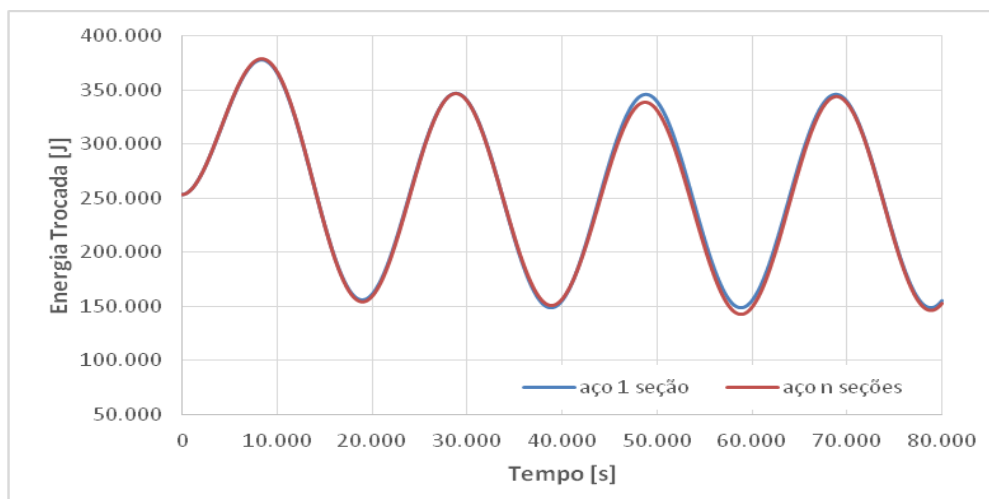


Figura 6.6 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido  $Q_{TROC}$ , para os modelos de seção única e de  $n$  seções. Material: aço AISI304.

Partindo-se para uma análise quantitativa, calcula-se, então, o desvio relativo entre curvas para cada instante de tempo através de

$$D_{rel} [\%] = \left( \frac{|Q_{TROC}^{1seção} - Q_{TROC}^{nseções}|}{Q_{TROC}^{nseções}} \right) 100 \quad (6.1)$$

na qual,  $Q_{TROC}^{1seção}$  é energia trocada, associada ao modelo de seção única, e  $Q_{TROC}^{nseções}$  é a energia trocada, associada ao modelo de  $n$  seções. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.7 abaixo.

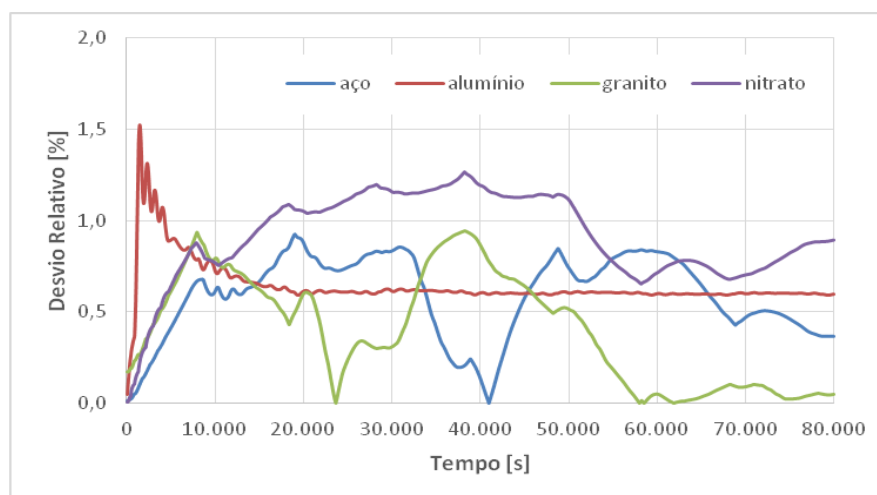


Figura 6.7 – Desvio relativo avaliado ao longo do tempo.

Nesta avaliação, apresentam-se os desvios obtidos para todos os materiais, visando oferecer uma visão geral. O desvio máximo está associado às primeiras iterações, para o caso do Alumínio. Após, o comportamento se estabiliza e os desvios não passam de 1%. Os outros materiais também apresentam flutuações no valor dos desvios relativos. Entretanto, com



exceção do nitrato que chega próximo a 1,5%, o aço e o granito apresentam desvios máximos que não ultrapassam 1%.

A análise dos resultados obtidos para a energia trocada pelo sólido indica que, para o caso estudado, a condução axial não influi significativamente. Assim, espera-se comportamento similar ao se analisar a temperatura de saída do fluido. Este comportamento pode ser visto a seguir, Figura 6.8. Verifica-se que ambos os modelos apresentam comportamento semelhante, corroborando a hipótese de se desprezar a condução axial para os casos analisados.

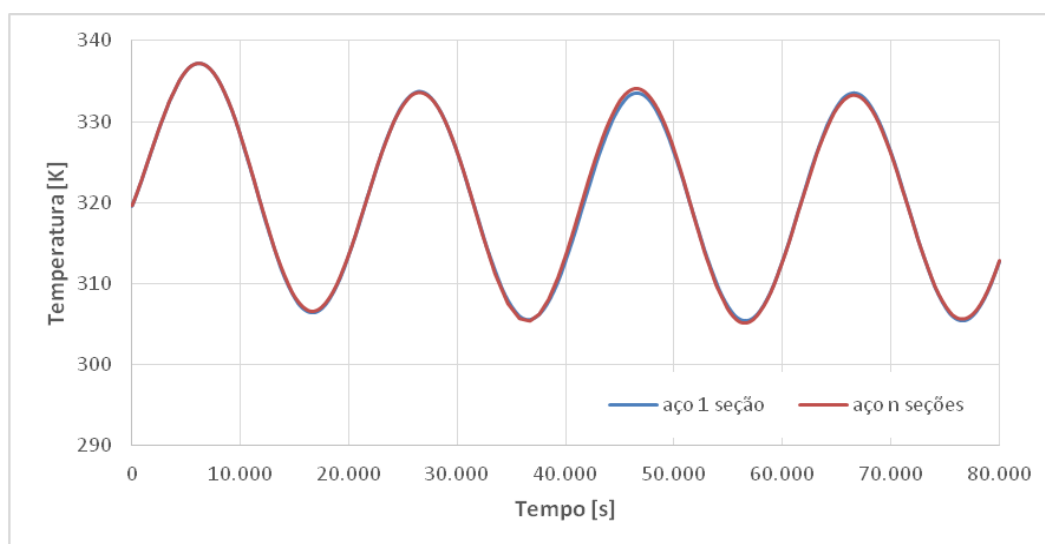


Figura 6.8 – Comportamento da temperatura de saída do fluido,  $T_{f,sai}$ , ao longo do tempo para os modelos de seção única e de  $n$  seções. Material: aço AIS304.

Os desvios absolutos entre as curvas da temperatura de saída do fluido foram calculados e são apresentados na Figura 6.9. Novamente, são apresentados os desvios obtidos para todos os materiais, visando oferecer uma visão geral. Com exceção do granito, que apresenta valores de desvio entre -1 e -2K, e do aço, com um pico de aproximadamente -1K logo após o instante de 4000s, todos os demais valores ficaram na faixa compreendida entre -0,5K e 0,5K.

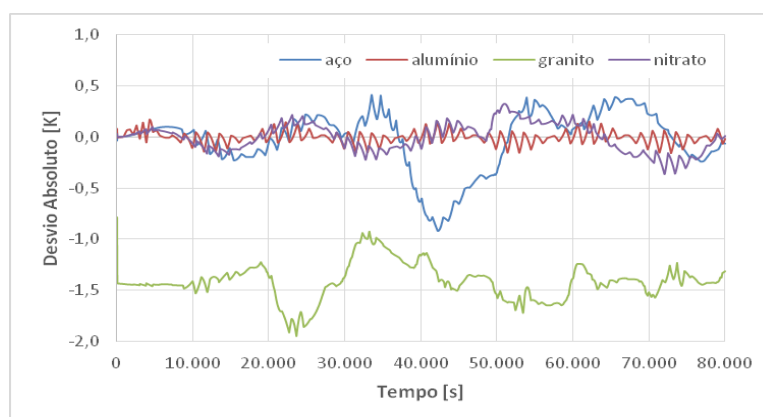


Figura 6.9 – Desvio absoluto da temperatura de saída do fluido  $T_{f,sai}$ , avaliado ao longo do tempo.

Para a avaliação do campo de temperaturas, foram escolhidos dois instantes, referentes ao momento em que a temperatura do sólido é máxima, 8360s, Figura 6.10, e ao momento em

que a temperatura do sólido é mínima, 58840s, Figura 6.11. Em ambas as figuras são apresentados os campos obtidos para os modelos de seção única e de  $n$  seções.

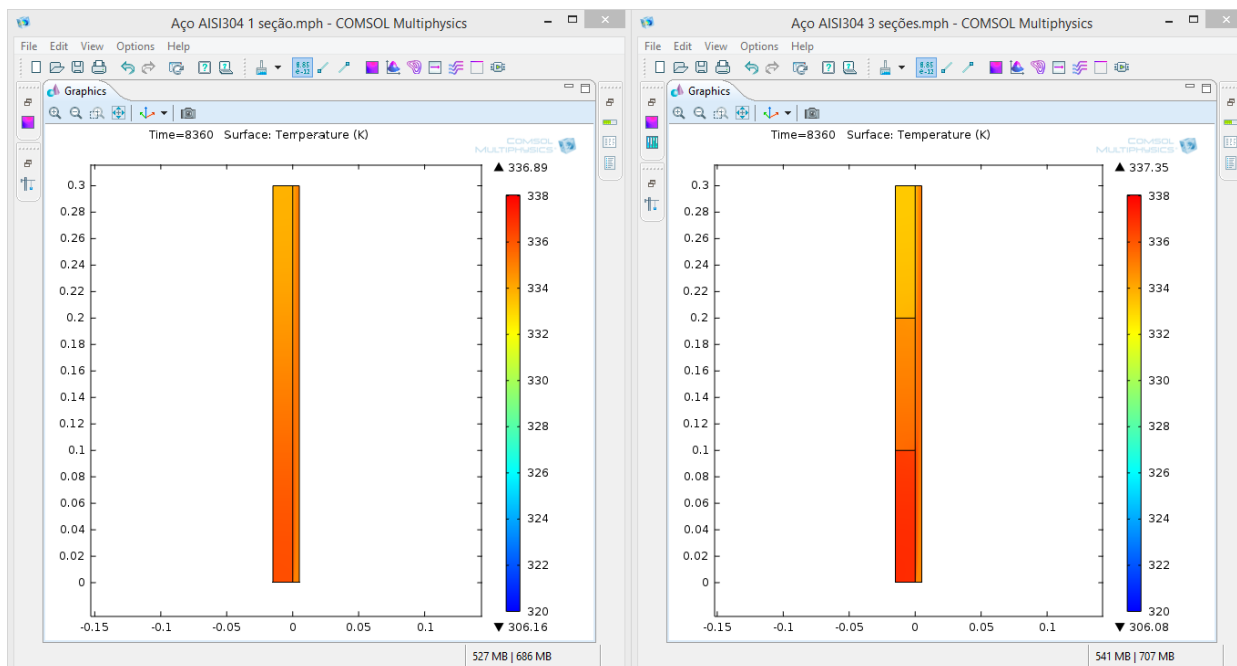


Figura 6.10 – Campo de temperaturas no instante em que a temperatura do sólido é máxima, Para os modelos de seção única e de  $n$  seções, respectivamente.

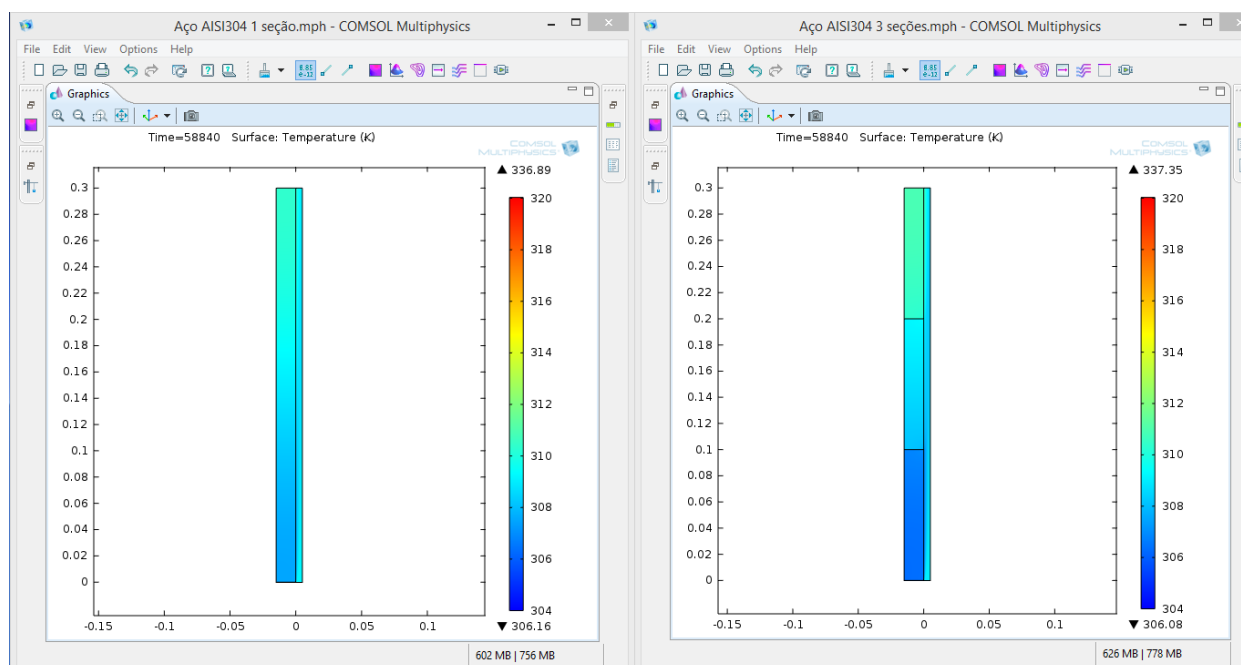


Figura 6.11 – Campo de temperaturas no instante em que a temperatura do sólido é mínima, Para os modelos de seção única e de  $n$  seções, respectivamente.

Nas figuras acima, pode-se observar que os campos de temperatura gerados estão em concordância. Para o instante de tempo apresentado na Figura 6.10, as temperaturas máximas foram de 336,89K, para o modelo de seção única, e de 337,35K, para o modelo de  $n$  seções. A

diferença relativa entre as temperaturas é de 0,14%. Para o instante de tempo apresentado na Figura 6.11, as temperaturas mínimas foram de 306,16K, para o modelo de seção única, e de 306,08K, para o modelo de  $n$  seções. Neste caso, diferença relativa entre as temperaturas é de 0,03%. Assim, a análise dos campos de temperaturas obtidos nos casos extremos, Figuras 6.1 e 6.2, também corrobora a hipótese de que, para o caso estudado, a condução axial não influi significativamente.

## 7. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar qualitativamente, para um sistema de acumulação de energia térmica sensível com comportamento periódico, se os efeitos axiais da condução de calor no sólido podem ser desconsiderados. Esta hipótese permite a utilização do Modelo da Capacitância Global, MCG, para a análise deste tipo de sistema. A grande vantagem desse modelo reside na sua natureza simplificada, eliminando a necessidade de se calcular os gradientes de temperatura ao longo do sólido, mantendo os parâmetros físicos importantes para a resolução do problema, e consequentemente diminuindo a necessidade de recursos computacionais significativos.

Utilizando-se o *software* comercial COMSOL<sup>®</sup>, foram simuladas duas geometrias, uma placa constituída por  $n$  seções (modelo de  $n$  seções) e uma placa de seção única (sem divisões internas). O primeiro modelo foi utilizado em um estudo semi-analítico e o segundo representa um modelo real. De acordo com a literatura especializada, os parâmetros-chave na avaliação da condução axial, para este tipo de problema são a energia trocada pelo sólido e a temperatura de saída do fluido.

Os desvios calculados entre os modelos simulados foram os seguintes: para a energia trocada, o desvio relativo não ultrapassou 1,5% para todos os materiais testados, tendo valores inferiores a 1% para a maioria dos instantes de tempo avaliados. No caso da temperatura de saída do fluido, o desvio absoluto, em módulo, teve valores inferiores a 2K para granito e inferiores a 1K para os demais materiais.

Portanto, a análise dos resultados obtidos para a energia trocada pelo sólido indicou que, para o caso estudado, a condução axial não influi significativamente. Verificou-se, também, que ambos os modelos apresentam comportamento semelhante, corroborando a hipótese de se desprezar a condução axial para os casos analisados. De maneira análoga, observa-se o mesmo para a temperatura de saída do fluido.

Como contribuição principal, destaca-se que o presente trabalho reforça a aplicação deste modelo simples, MCG, para casos envolvendo esse tipo de acumulador, bem como para corroborar o método semi-analítico utilizado para comparação. Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação para casos mais genéricos, por exemplo, envolvendo outras geometrias. Não obstante, sugere-se, também, a busca por um parâmetro adimensional que leve em consideração o efeito da condução axial em sistemas de acumulação e energia térmica sensível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andriotty, T.H.; **“Otimização de Estruturas para Acumulação de Calor Sensível”**, Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Bal, L. M.; Satya, S.; Naik, S. N.; **“Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review”**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, p. 2298-2314, 2010.

COMSOL **“COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> User’s Guide”**, Versão 4.3a, 2012.

Incropera, F.P. *et al.*, **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, LTC, Brasil, 6ª edição, 2008.

Jian, Y. *et al.*, **“Design and optimization of solid thermal energy storage modules for solar thermal power plant applications”**, Applied Energy 139, p. 30-42, 2015.

Sragovich, D.; **“Transient Analysis for designing and predicting Operational Performance of a High Temperature Sensible Thermal Energy Storage System”**, Solar Energy, Vol. 43, n. 1, p. 7-16, 1989.

## APÊNDICE A - Resultados obtidos para os outros materiais simulados

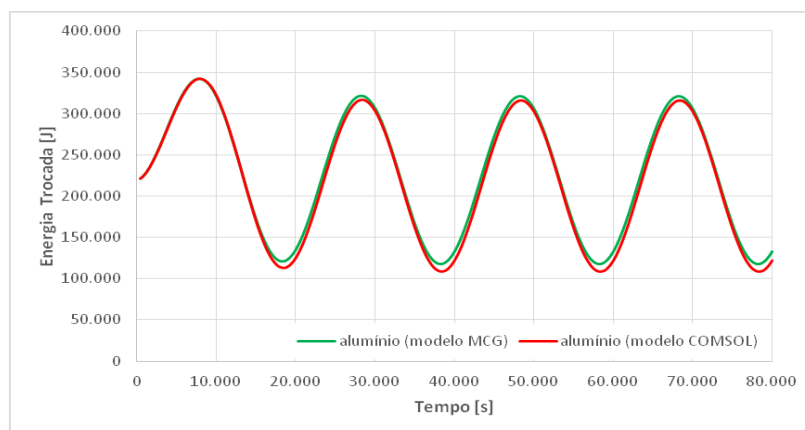


Figura A.1 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{Troc}$ , Material: alumínio puro. Os desvios absolutos máximo e mínimo entre os modelos são 1180J e 2,29J, respectivamente.

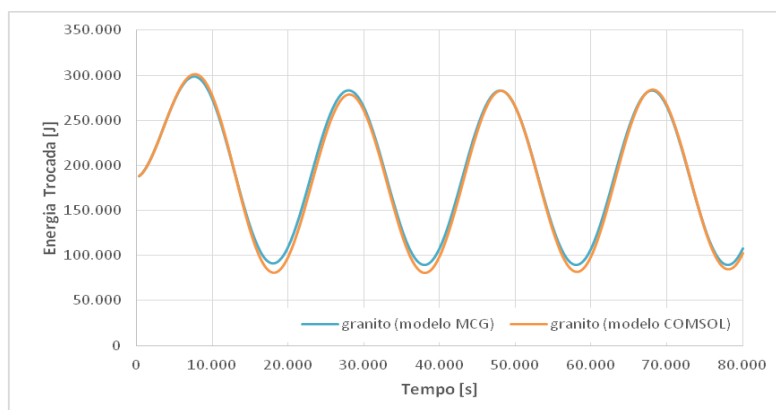


Figura A.2 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{Troc}$ , Material: granito. Os desvios absolutos máximo e mínimo entre os modelos são 1120J e 4,77J, respectivamente.

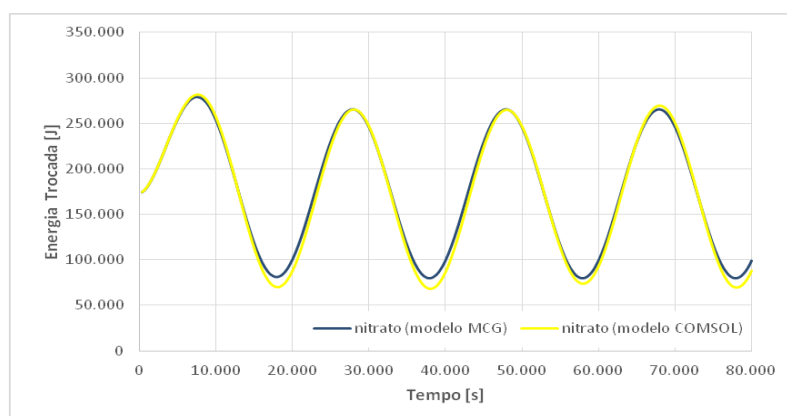


Figura A.3 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{Troc}$ , Material: nitrato de silicone. Os desvios absolutos máximo e mínimo entre os modelos são 1320J e 3,46J, respectivamente.

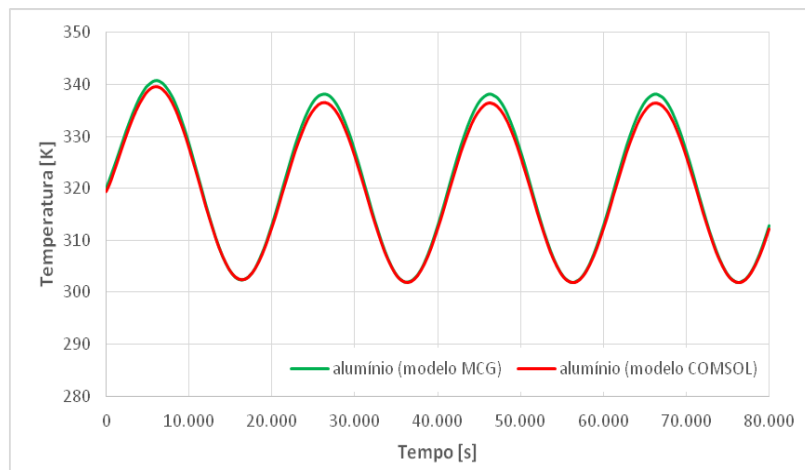


Figura A.4 – Comportamento temperatura de saída do fluido,  $T_{f,sai}$ , ao longo do tempo. Material: alumínio puro. Os desvios absolutos máximo e mínimo entre os modelos são 1,58K e 0,001K, respectivamente.

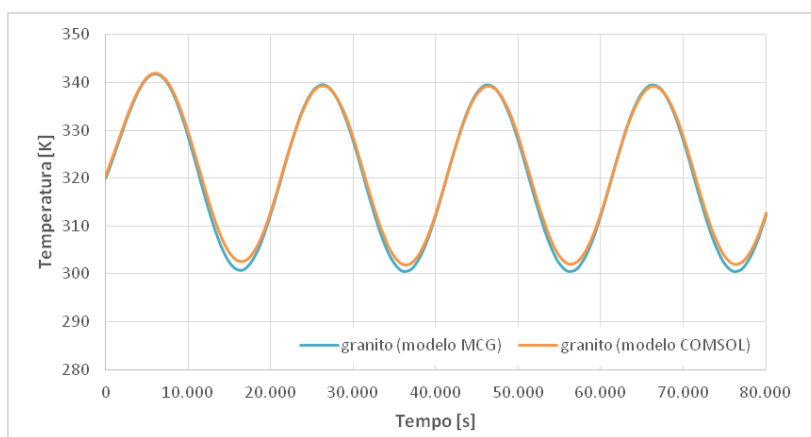


Figura A.5 – Comportamento temperatura de saída do fluido,  $T_{f,sai}$ , ao longo do tempo. Material: granito. Os desvios absolutos máximo e mínimo entre os modelos são 2,00K e 0,003K, respectivamente.

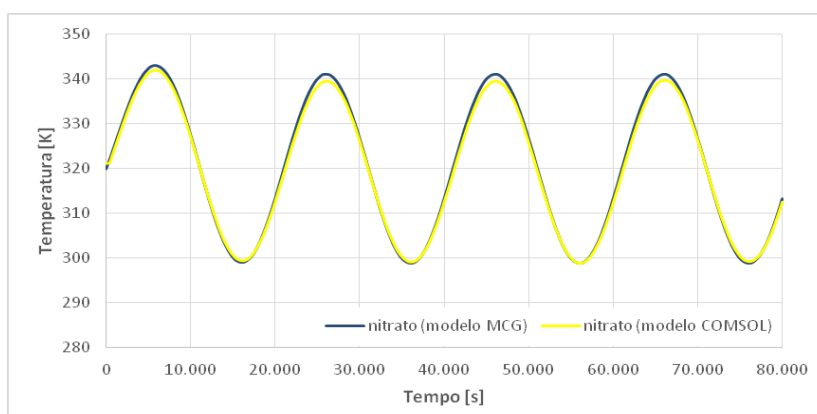


Figura A.6 – Comportamento temperatura de saída do fluido,  $T_{f,sai}$ , ao longo do tempo. Material: nitrato de silicone. Os desvios absolutos máximo e mínimo entre modelos são 1,69K e 0,008K, respectivamente.

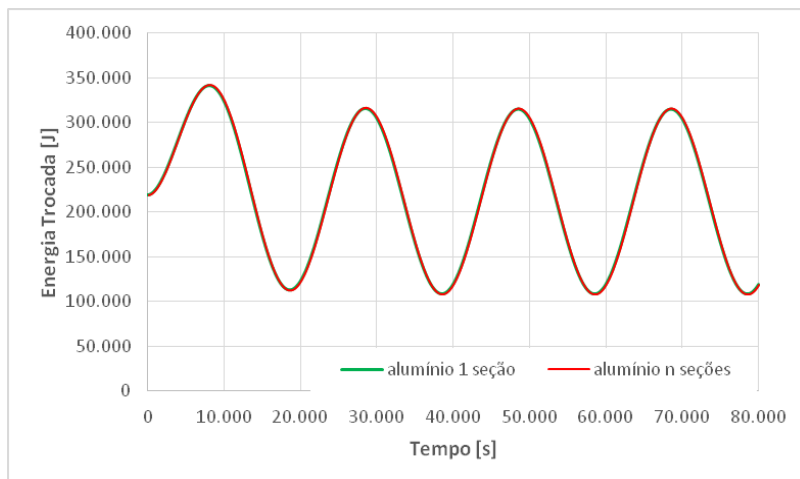


Figura A.7 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{Troc}$ . Material: alumínio puro.

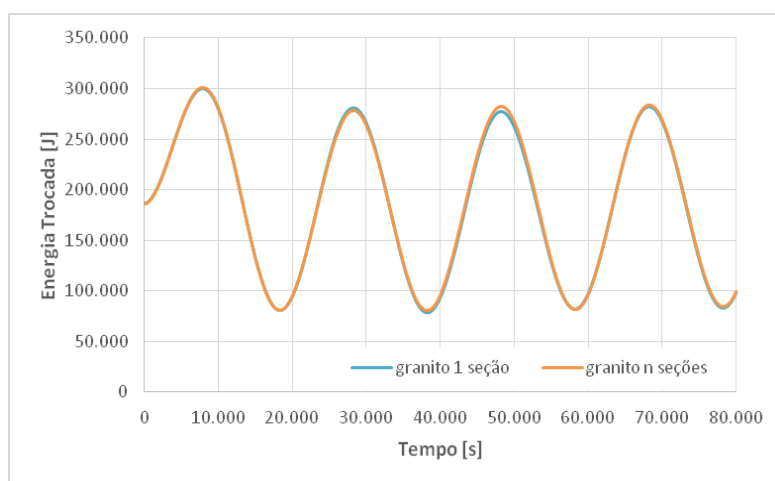


Figura A.8 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{Troc}$ . Material: granito.

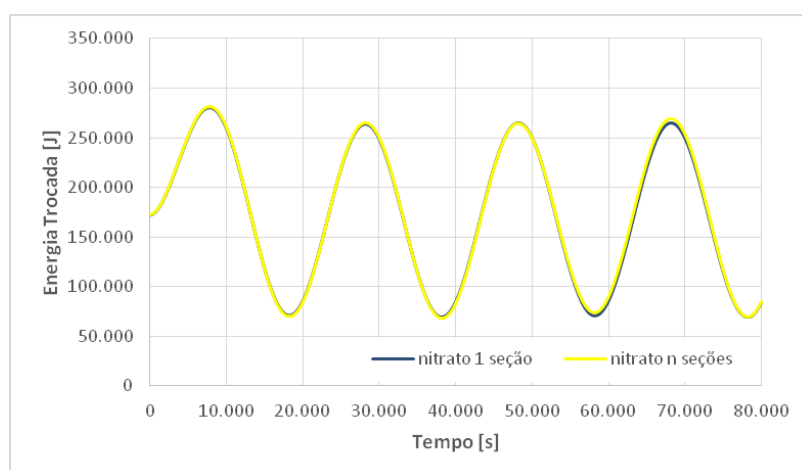


Figura A.9 – Evolução temporal da energia trocada pelo sólido,  $Q_{Troc}$ . Material: nitrato de silicone.

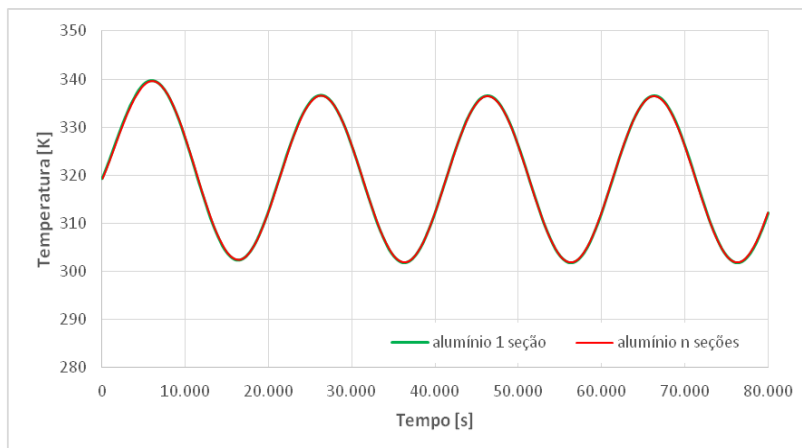


Figura A.10 – Comportamento da temperatura de saída do fluido,  $T_{f,saí}$ , ao longo do tempo. Material: alumínio puro. Os desvios absolutos máximo e mínimo são 0,174K e 0,00001K, respectivamente.

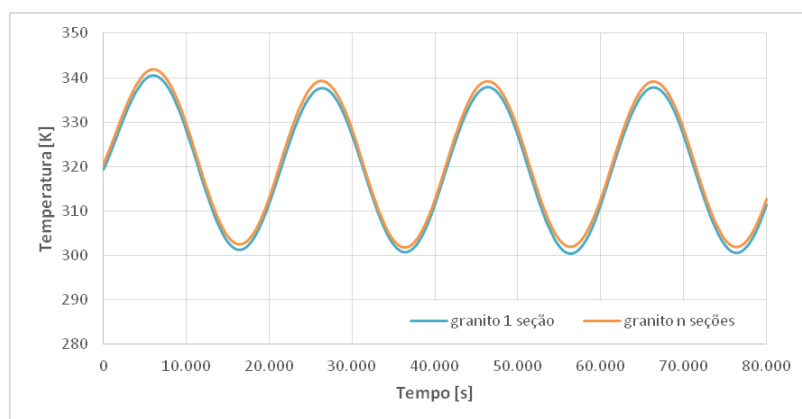


Figura A.11 – Comportamento da temperatura de saída do fluido,  $T_{f,saí}$ , ao longo do tempo. Material: granito. Os desvios absolutos máximo e mínimo são 1,947K e 0,786K, respectivamente.

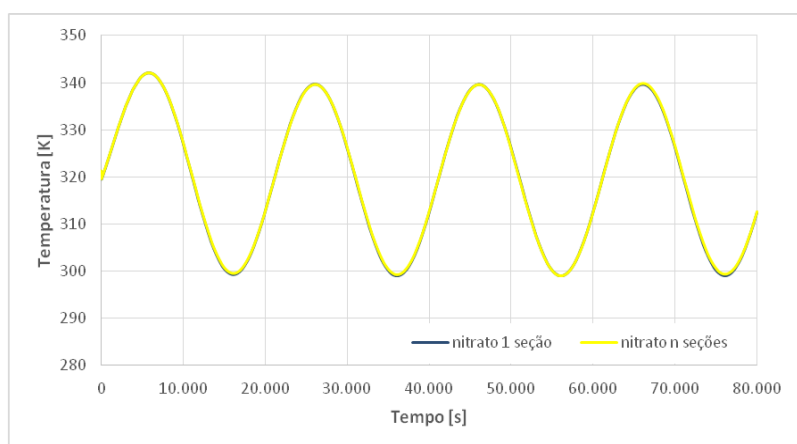


Figura A.12 – Comportamento da temperatura de saída do fluido,  $T_{f,saí}$ , ao longo do tempo. Material: nitrato de silicone. Os desvios absolutos máximo e mínimo são 0,359K e 0,0001K, respectivamente.