

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ROTOR DA TURBINA A VAPOR

Renato Augusto Almeida Macedo, renatomec.utf@gmail.com  
Laercio Javarez Junior, laerciojunior@utfpr.edu.br  
Wayner Sales Junior, waynerjunior@hotmail.com  
Juliana Levandoski Halila, julianalkhalila@gmail.com

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Monteiro Lobato, s/n – Km 04 – CEP: 84016-210 – Ponta Grossa – PR

**RESUMO:** A simulação computacional é uma ferramenta muito utilizada para otimizar e auxiliar no desenvolvimento de um produto, pois aproxima o projeto idealizado do produto real. No problema apresentado, foi utilizada a simulação computacional como ferramenta para identificar pontos críticos de operação de uma turbina a vapor, responsável pela redução na vida útil, causadas pela fluência e fadiga em componentes principais dessa turbina. Os rotores de uma turbina a vapor são os componentes que mais sofrem com essa redução da vida útil, sendo este componente o objeto de estudo. Com o auxílio da literatura e do corpo docente da universidade, encontrou-se uma possível solução para o problema, o emprego de uma convecção forçada ao longo do tubo central do rotor, utilizando ar seco aquecido como fluido de trabalho. Através do ANSYS®, um software de simulação comercial, realizou-se a parametrização e otimização das variáveis influentes na vida útil do rotor, com o intuito de encontrar estatisticamente os melhores valores que satisfaçam a solução proposta para o problema. Em seguida, utilizando esses valores ótimos encontrados, efetuou-se simulação computacional para verificar o comportamento dessa solução proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação Computacional, Turbina a vapor, Ansys®

**ABSTRACT:** A computer simulation is a widely used tool to optimize and assist in the development of a product as it nears the idealized design of the actual product. In the given problem, the computer simulation was used as a tool to identify critical points of operation of a steam turbine, responsible for the reduction in useful life caused by fluency and fatigue in major components such turbine. The rotor of a steam turbine are the components most affected by this decline in life, this component being the object of study. With the help of literature and university faculty, found a possible solution to the problem, employing a forced along the central tube rotor convection, using warm dry air as the working fluid. Through the ANSYS®, a commercial simulation software, was held parameterization and optimization of influential variables in the life of the rotor, in order to statistically find the best values that satisfy the proposed solution to the problem. Then, using these optimal values found, we performed computer simulations to verify the behavior of this proposed solution.

**KEYWORDS** computer simulation, steam turbine, Ansys®

### INTRODUÇÃO

Atualmente a necessidade por um constante aperfeiçoamento de componentes para uma otimização de maquinários e produtos é um desafio frequente no ambiente industrial. Desta forma a simulação computacional atualmente vem atuando com uma ferramenta muito importante para a validação e otimização no processo de desenvolvimento do produto, pois proporciona a aproximação desde a idealização do produto até a construção e produção do produto real. Exemplos da utilização do software de simulação estão presentes na indústria automobilística, nuclear, eólica, petrolífera dentre outras indústrias de transformação.

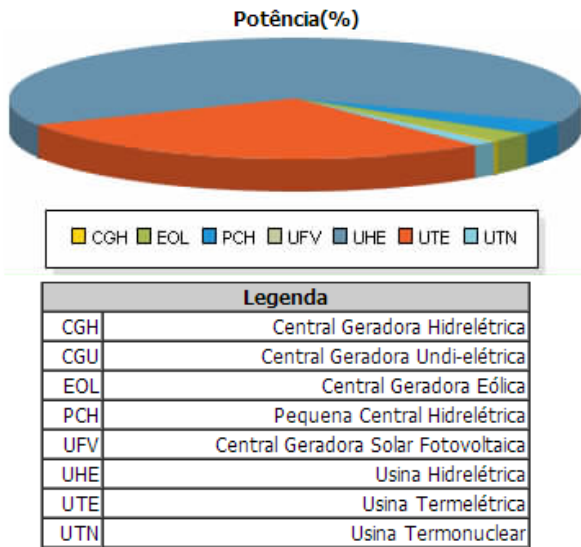
Para a ocorrência desses aperfeiçoamentos, é necessário voltar às atenções para os principais componentes que constituem um sistema maior. Desta forma, perante ao problema de fluência e fadiga de baixo ciclo encontrado em uma turbina a vapor, optou-se por investigar as causas ocorridas ao longo do rotor desta turbina a vapor.

Sendo assim este trabalho consiste em otimizar e propor solução ao rotor da turbina a vapor causada por uma fadiga termomecânica, cuja a essência está em elevadas variações de tensão térmica.

### METODOLOGIA

#### Descrição do problema

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2014 a capacidade geração de energia elétrica no Brasil é composta em sua maior parte, 80% pelas usinas hidrelétricas, seguida pelas usinas termoeletricas, sendo esta, alimentadas por diferentes fontes de combustíveis como: Carvão, biomassa, gás e nuclear. A “Fig.(1)” mostra um gráfico representando a distribuição da capacidade de geração de energia elétrica em operação no Brasil por diferentes fontes de geração da mesma.



**Figura 1.** Distribuição das capacidades de geração de energia elétrica no Brasil

Diferente dos outros países onde as usinas termoelétricas são sujeitas a menores ciclos de partida e paradas, no Brasil, por razões de segurança energética e elétricas esta operação é submetida a um número maior de ciclos de partida e parada. Este fato provoca um maior estresse nos componentes da turbina, sendo o rotor o componente mais prejudicado da turbina.

A “Fig.” (2) mostra o modelo do rotor de uma turbina a vapor identificados pelos seus estágios de operação.



**Figura 2.** Modelo do rotor da turbina a vapor

Foram coletados dados de temperatura e pressão pontuais ao longo do rotor ao longo de 29700 segundos com um intervalo de 300 segundos entre cada dado de temperatura e pressão coletado. A Tabela 1 e 2 mostra os valores iniciais e finais coletados, porém para a simulação no ANSYS® utilizou-se todos os dados coletados, durante os 29700 segundos. A “Fig.(3)” mostra os pontos do rotor onde foram aplicadas as pressões e temperaturas.

**Tabela 1.** Dados coletados de pressão no início e fim de operação

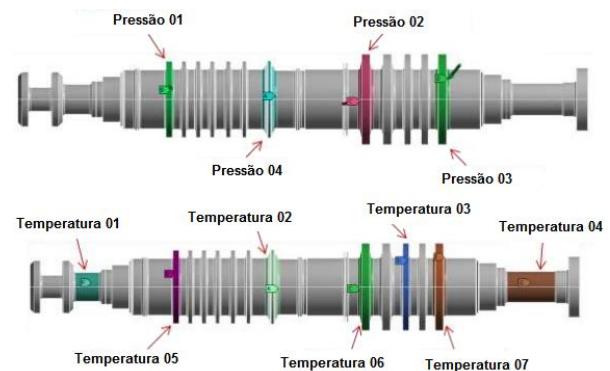
Pressão (bar)	Tempo 0s	Tempo 29700s
01	0	19,066
02	12,742	34,152
03	0	21,152
04	32,4271	160,066

**Tabela 2.** Dados coletados de temperatura no início e fim de operação

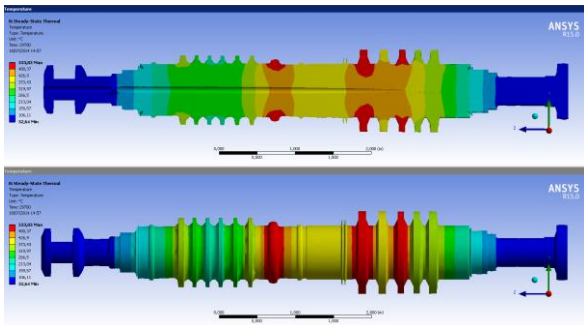
Temperaturas (°C)	Tempo 0s	Tempo 29700s
01	39,748	70,040
02	267,253	519,150
03	242,025	488,814
04	39,275	73,090
05	230,784	336,710
06	263,993	533,582
07	203,416	362,933

Conforme esses dados realizou-se a simulação do rotor da turbina, e verificou-se uma distribuição de temperatura e pressão de maneira adversa, havendo variações bruscas de tais condições, podendo ser a principal causa da falha e a diminuição da vida útil do componente da turbina, como podemos observar nas “Fig.(4)” e “Fig.(5)”.

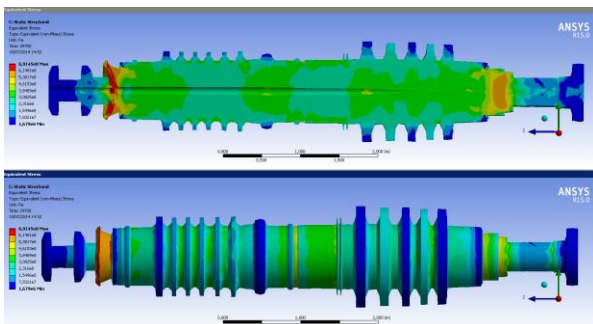
Buscando alternativa de solução na bibliografia e com o auxílio do corpo docente da universidade, encontrou-se como solução o emprego de uma convecção forçada ao longo do canal, localizado no interior do rotor da turbina a vapor. Contudo, para simular esses parâmetros escolhidos, demanda-se um custo operacional muito grande, devido à limitação de processamento do computador e a grande quantidade de dados variáveis de temperatura e pressão atuantes no componente da turbina.



**Figura 3.** Localização das pressões e temperaturas localizadas ao longo do rotor da turbina



**Figura 4.** Resultado das temperaturas geradas pela simulação empregando as condições iniciais de operação do rotor da turbina



**Figura 5.** Resultado das tensões principais geradas pela simulação empregando as condições iniciais de operação do rotor da turbina

Deste modo optou-se pela parametrização a fim de otimizar os resultados para chegar-se a um melhor direcionamento da solução sugerida em um menor tempo de custo computacional. Para esta parametrização foi utilizada método estatístico *Non-Parametric Regression* (regreção não paramétrica) presente no Design explorer do ANSYS® Workbench Mechanical. Este método estatístico consiste em aproximar um modelo não linear para um modelo linear, facilitando o ajuste da função do problema estudado.

Porém para que tal solução seja adotada, é necessário definir as condições de contorno. Sendo estas, a temperatura do ar na entrada do tubo do rotor e o coeficiente convectivo. Valores de tensões equivalentes máximas e mínimas no começo de rotação, no final e a média destes valores também foram parametrizados como valores de saída para que pudessem ser minimizados.

Seguido da parametrização, analisou-se a sensibilidade dos parâmetros do coeficiente de convecção do canal interno do rotor e a temperatura do ar, afim de verificar a sua influência nas tensões equivalentes média de Von Mises.

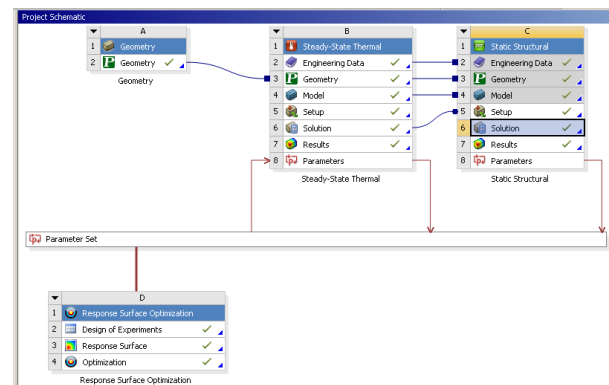
Sendo assim, por meio então da parametrização, utilizou-se uma ferramenta de otimização presente no software de simulação, utilizado como recurso estatístico. A otimização forneceu três candidatos de acordo com as condições de contorno escolhidas.

A escolha do melhor candidato da otimização, se baseou nas comparações entre os valores dos três

candidatos que obtivessem em valores mínimos de tensão equivalente máxima e mínima, junto aos tempo iniciais e finais da ocorrência do problema.

A fim de se obter resultados confiáveis durante a simulação realizou-se o refinamento da malha ao longo do sólido (rotor da turbina a vapor) e empregou-se a *virtual topology*. Este método também auxiliou tanto na melhoria da qualidade da malha de elementos finitos, avaliado através do método avaliativo Skewness, quanto na melhoria no custo computacional. O método Skewness tenta aproximar a face o elemento finito ao mais próximo do real, em que a avaliação do tipo de malha é realizada por meio da comparação entre o modelo ideal de geometria e a geometria gerada pela malha, onde os valores próximos a 1 são consideráveis perfeitos e 0 inaceitáveis.

A “Fig.(6)” mostra as ferramentas do ANSYS® empregada para o estudo do presente trabalho. Tomou-se como relevância, além da análise térmica e estrutural, a parametrização e a otimização das condições de contorno conforme já mencionados.



**Figura 6.** Interfaces utilizadas para concepção da solução do problema proposto pelo desafio

O presente trabalho utilizará como base o software comercial ANSYS® Workbench 15.0, como ferramenta de estudo, para realizar a simulação computacional do rotor da turbina a vapor.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme já mencionado no trabalho, realizou o trabalho sob o melhoramento da malha, sendo utilizado a *virtual topology*. Chegou-se então em uma média de qualidade de elemento próxima da qualidade boa da qualidade de malha segundo o método avaliativo de malha Skewness, como podemos observar na Figura 6 retirada do ANSYS®. Os valores médios de 0,5684 são considerados resultados de uma boa malha, conforme o método de Skewness (ANSYS®, 2012). Outro fator em que a *virtual topology* influenciou foi na diminuição considerável no número de nós e valores melhores em termos de custo computacional, podendo também ser observado na “Fig.(7)”, onde mostra duas gerações de malha, sem e com *virtual topology*.

Details of "Mesh"		Details of "Mesh"	
Advanced		Advanced	
Defeaturing		Defeaturing	
Statistics		Statistics	
Nodes	111321	Nodes	33444
Elements	65032	Elements	19407
Mesh Metric Skewness		Mesh Metric Skewness	
Min	4,82149966313206E-03	Min	1,08763639901865E-02
Max	0,999999681732959	Max	0,99999995139214
Average	0,580210875829756	Average	0,568418237536849
Standard Deviation	0,249351359316751	Standard Deviation	0,24937031162404

a) Malha sem Virtual Topology

b) Malha com Virtual Topology

Figura 7. Comparativo entre as malhas retirada do ANSYS®

No o processo de parametrização avaliou-se as distribuições de temperatura entre 45 e 500 °C e o coeficiente convectivo entre 20 e 100 W/(m².°C) (Incropera, 2008). Com o auxílio da ferramenta *Response Surface*, utilizou-se do método estatístico, e analisaram-se o comportamento valores de coeficiente convectivo e temperaturas máximas e mínimas em função da tensão equivalente máxima, como mostra as "Fig.(8)" e "Fig.(9)".

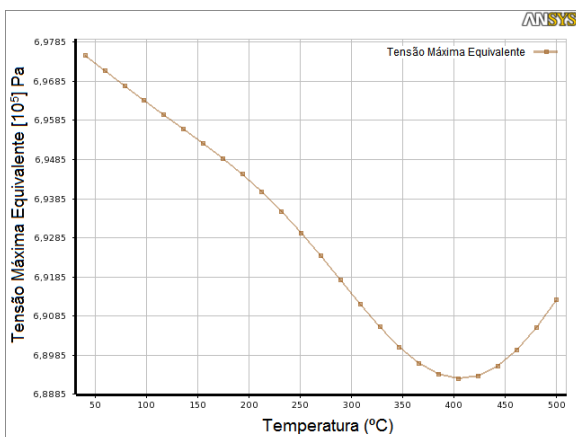


Figura 8. Variação da equivalente máxima de tensão vs variação da temperatura do ar

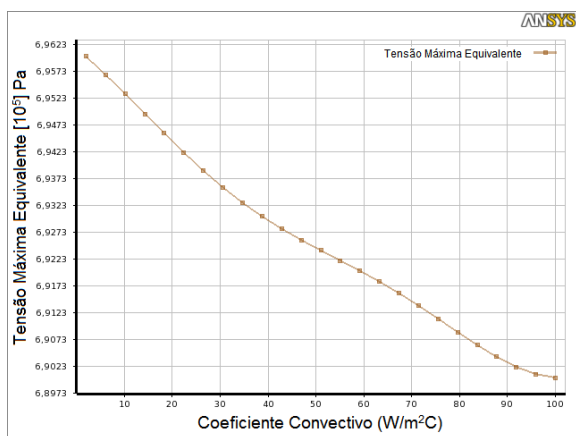


Figura 9. Variação da equivalente máxima de tensão vs variação do coeficiente convectivo

Posteriormente verificou-se a influência do coeficiente convectivo e a temperatura em parâmetros como

tensões equivalentes máximas e mínimas e temperaturas máximas e mínimas, sendo possível determinar a sensibilidade, como mostra a "Fig.(10)" e "Fig.(11)". A determinação da sensibilidade demonstrou o quanto cada parâmetro citado acima influência diretamente na robustez do projeto, determinando a viabilidade ou sucesso do estudo.

Após a obtenção de tais resultados, fez-se uso da ferramenta de otimização, buscou-se como objetivo valores mínimos de tensão equivalente máxima e mínima, obtendo-se três candidatos como determina a "Fig.(12)".

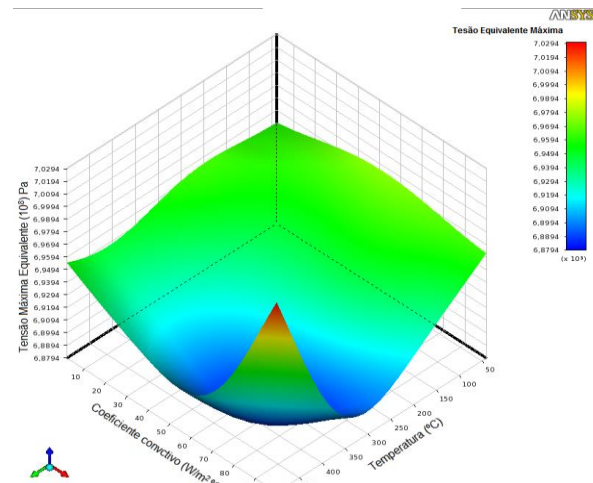


Figura 10. Resposta 3D, das variações de equivalente máxima de tensão vs temperatura do ar vs coeficiente convectivo

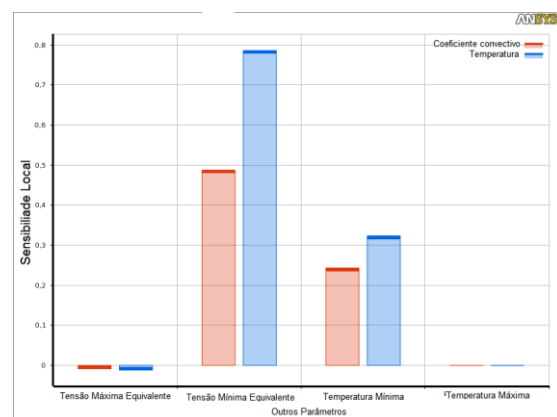


Figura 11. Sensibilidade dos parâmetros mediante as mudanças de temperatura e coeficiente convectivo.

Candidato Point	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
P17 - convecção cano Film Coefficient (W m <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup> )	79,562	72,217	76,622
P18 - convecção cano Ambient Temperature (C)	197,19	161,93	265,92
P5 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	★ 6,9359E+08	→ 6,349E+08	★★ 6,9123E+08
P6 - Equivalent Stress Minimum (Pa)	★★★ 2,2926E+06	★★ 1,7631E+06	★ 3,3007E+06
P13 - Equivalent Stress Minimum Minimum Value Over Time (Pa)	→ 6,4287E+05	→ 7,2165E+05	★ 4,5739E+05
P14 - Equivalent Stress Maximum Minimum Value Over Time (Pa)	★★★ 3,095E+06	★★ 3,2431E+06	★★★ 4,0589E+06
P15 - Equivalent Stress Minimum Maximum Value Over Time (Pa)	→ 5,7189E+08	★ 5,6799E+08	→ 5,8501E+08
P16 - Equivalent Stress Maximum Maximum Value Over Time (Pa)	→ 7,3195E+08	× 7,3282E+08	→ 7,3093E+08

Figura 12. Candidatos da otimização

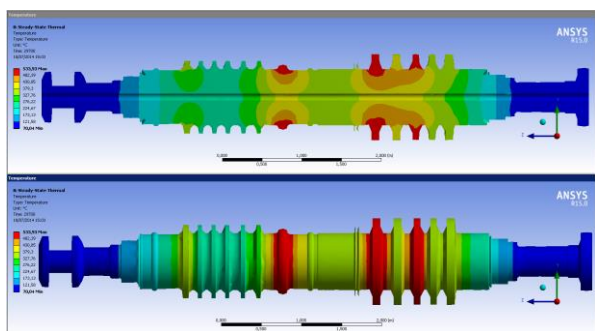


De acordo com a “Fig.(12)”, podemos observar que os valores que se encontraram dentro dos parâmetros requisitados para o trabalho foi o primeiro candidato, possuindo valores mínimos de tensão equivalente máxima e mínima, junto dos tempos iniciais e finais da ocorrência da avaria.

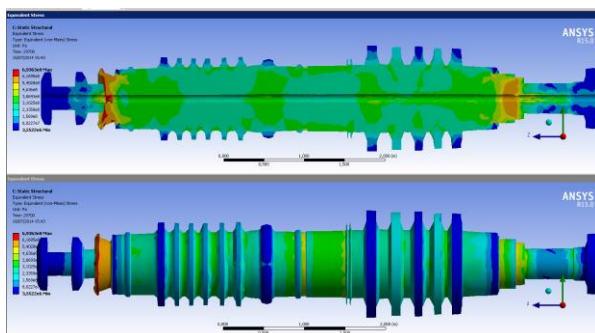
Desta forma aplicou-se esses parâmetros do primeiro candidato conforme a Tabela 3 e obteve os seguintes resultados mostrado na “Fig.(13)” e “Fig.(14)”.

**Tabela 3.** Parametros utilizados na simulação. Primeiro candidato

Propriedades	Candidato 1
Convecção no cano – Film Coefficient (w/m <sup>2</sup> C)	79,562
Convecção cano – Ambient Temperature (C)	197,19



**Figura 13.** Resultados das temperaturas geradas pela simulação utilizando a convecção forçada ao longo do tubo no interior do rotor da turbina



**Figura 14.** Resultados das tensões geradas pela simulação utilizando a convecção forçada ao longo do tubo no interior do rotor da turbina

Observando e comparando os resultados das Figura 4 e 5 com as Figura 13 e 14, constatou-se que o emprego da convecção forçada utilizando o ar aquecido sem humidade como fluido de trabalho, houve uma maior distribuição de temperatura e tesões ao longo do rotor. Este fato pode comprovado por meio da presença de

cores mais claras ao longo do rotor da Figura 13 e 14, representando a distribuição das propriedades nas quais se pretendiam avaliar, as temperaturas e as tensões presentes na operação de trabalho do rotor, como possíveis responsáveis pelo comprometimento da vida útil do rotor da turbina.

## CONCLUSÃO

Como pode ser verificado nos resultados, a utilização de uma convecção forçada com temperatura elevada utilizando o ar seco como fluido de trabalho, houve a melhora na distribuição das temperaturas e das tensões ao longo do rotor, resultando em uma possível solução para a otimização ao problema.

Este fato verificado refere-se ao coeficiente convectivo, onde quanto maior o seu valor, melhor a equalização das tensões e temperaturas ao longo do rotor. Contudo o ar não possui valores tão altos de coeficiente convectivos, visto isto, o projeto apresentado pode ter uma continuidade sugerindo alterações.

Em relação a utilização das ferramentas disponíveis no ANSYS®, o emprego da topologia virtual auxiliou em uma simplificação da geometria do rotor, afim de uma melhorar a geração e a qualidade da malha, diminuindo o número de nós e elementos, conseguindo um melhor custo computacional.

As parametrizações, junto das ferramentas estatísticas, foram de grande auxílio como base para inicio dos problemas encontrado. Com isso, conseguimos realizarmos a simulação referenciada em dados próximo com a realidade do problema, gerando uma solução próximo do problema real encontrado na turbina a vapor.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL,2014. Agência Nacional de Enegia Elétrica.30 de junho 2014.
- ANSYS. ANSYS,Inc, disponível em < <http://ansys.com.br>>, acessado em junho de 2014.
- ANSYS. Theory Manual, Release 15, ANSYS Inc., USA, 2013.
- INCROPERA, Frank P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6. Ed. Rio de Janeiro, RJ:. LTC, 2008 xix, 643 p.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores é são os únicos responsáveis pelo trabalho.