

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO ACUMULADOR DE UM  
VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO

por

Andre Giacomini Dias Carmona

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, Maio de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Carmona, Andre Giacomini Dias  
ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO ACUMULADOR DE  
UM VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO / Andre Giacomini  
Dias Carmona. -- 2021.  
15 f.  
Orientador: Thamy Cristina Hayashi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Célula de bateria ion lítio. 2. Arrefecimento.  
3. Fórmula SAE. I. Hayashi, Thamy Cristina, orient.  
II. Título.

Andre Giacomini Dias Carmona

ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO ACUMULADOR DE UM  
VEÍCULO ELÉTRICO DE COMPETIÇÃO

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  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, Maio de 2021

## DEDICATÓRIA

A minha mãe Marisa, ao meu irmão Adriano, a minha avó Neide, a minha namorada Anelisa e ao restante da minha família, agradeço todo amor e suporte até aqui. Dedico com muito carinho o resultado deste trabalho.

Aos professores, sou imensamente grato pela aprendizagem e orientação em minha trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Paulo, Igor e Thamy, pelos aprendizados e auxílios neste trabalho e em todos os projetos e anos de e-Power UFRGS. Em especial a professora Thamy pela orientação e auxílio neste trabalho e em todas os conselhos que foram feitos a mim. Agradeço também a todos meus amigos da universidade e do estágio, por sempre me levantarem em momentos difíceis e auxiliarem com amizade e aprendizado.

Carmona, Andre Giacomini Dias. **Análise de transferência de calor do acumulador de um veículo elétrico de competição.** 2021. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## RESUMO

O desenvolvimento de carros elétricos demanda o estudo de sistemas de arrefecimento do banco de baterias para evitar a degradação das células e garantir a operação segura. Neste trabalho é feita uma análise da transferência de calor de uma proposta de sistema de arrefecimento do acumulador de um protótipo de competição tipo Formula SAE. Um modelo numérico de um setor de baterias encamisado em um bloco metálico dotado de um tubo para passagem de fluido refrigerante foi desenvolvido e implementado através do pacote computacional CFX. Resultados da solução do modelo foram comparados com dados experimentais obtidos para este fim. A simulação do sistema foi realizada para analisar a influência da variação da vazão e temperatura do fluido refrigerante, da temperatura inicial do conjunto e da resistência de condução nas interfaces bloco-célula e bloco-tubo. O modelo numérico foi utilizado para verificar a influência de diferentes condições de operação sobre a temperatura das células. Os resultados indicaram a viabilidade de desenvolvimento do sistema com uso de bombas disponíveis comercialmente. Também apontou para a vantagem de se desenvolver o projeto do bloco e tubo como peça única.

**PALAVRAS-CHAVE:** Célula de bateria íon lítio, arrefecimento, Fórmula SAE, análise numérica, ANSYS CFX.

Carmona, Andre Giacomini Dias. **Analysis of heat transfer from the accumulator of a competition electric vehicle.** 2021. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## ABSTRACT

The development of electric cars requires the study of battery cooling systems to prevent cell degradation and ensure safe operation. In this work an analysis of the heat transfer of a proposed accumulator cooling system of a Formula SAE competition prototype is made. A numerical model of a battery sector encased in a metal block with a tube for the passage of coolant was developed and implemented using the CFX computational package. Results of the model solution were compared with experimental data obtained for this purpose. The system simulation was carried out to analyze the influence of the variation in the flow and temperature of the refrigerant, the initial temperature of the set and the conduction resistance in the block-cell and block-tube interfaces. The numerical model was used to verify the influence of different operating conditions on cell temperature. The results indicated the feasibility of developing the system using commercially available pumps. He also pointed to the advantage of developing the block and tube design as a single piece.

**KEYWORDS:** Battery cell ion lithium, cooling system, Formula Student, numerical model, ANSYS CFX.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Geometria do setor estudado .....	3
Figura 2 – a) bancada, com os equipamentos de aquisição, ainda sem os sensores montados, b) vista superior do setor com as células, c) detalhe do circuito de aquisição.....	3
Figura 3 – Circuito elétrico do experimento .....	4
Figura 4 – Geometria analisada no modelo numérico .....	5
Figura 5 – a) Vista superior da malha 4, b) Vista isométrica da malha 4.....	7
Figura 6 – Evolução da temperatura dos pontos medidos no experimento. ....	9
Figura 7 – Evolução das temperaturas para o experimental e numérico análogo.....	9
Figura 8 – Evolução do campo de temperatura no plano vertical que contém os eixos do tubo e da célula. ....	11
Figura 9 – Evolução da temperatura da célula em função da temperatura do fluido para as vazões de 4,17 L/min (a) e 1,67 L/min (b). ....	12
Figura 10 – Evolução da temperatura da célula com diferentes temperaturas iniciais para as vazões de 4,17 L/min (a) e 1,67 L/min (b). ....	13
Figura 11 – Evolução da temperatura da célula no seu eixo central em função da resistência de contato entre o bloco e o tubo. ....	13
Figura 12 – Evolução da temperatura da célula em função da resistência de contato entre o bloco e a célula para as vazões de 1,67 L/min (a) e 4,17 L/min (b). ....	14
Figura 13 – Tabela 3.2 Resistência térmica em interfaces sólido/sólido representativas, página 75 da 4 edição. ....	17
Figura 14 – Tabela A.1 Propriedades termofísicas de sólidos metálicos selecionados, página 624 da 4 edição. ....	17
Figura 15 – Tabela A.5 Propriedades termofísicas de fluidos saturados, página 638 da 4 edição.....	18
Figura 16 – Tabela A.6 Propriedades termofísicas da água saturada, página 640 da 4 edição.....	18
Figura 17 – Desenho Técnico Célula de Íon Lítio .....	19
Figura 18 – Desenho técnico do tubo .....	19
Figura 19 – Desenho técnico do bloco.....	19
Figura 20 – Posicionamento dos sensores no setor.....	22

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Lista de componentes.....	3
Tabela 2 – Sensores utilizados na bancada de teste.....	4
Tabela 3 – Características das malhas durante o refinamento. ....	7
Tabela 4 – Resultados do GCI.....	7
Tabela 5 – Propriedades dos domínios do modelo. ....	8
Tabela 6 – Tabela com as equações de calibração dos sensores, resolução e incertezas. ..	22

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$q_c$	Potência calorífica	[W/m <sup>3</sup> ]
$k$	Condutividade térmica	[W/mK]
A	Área	[m <sup>2</sup> ]
$l$	Comprimento característico	[mm]
$C_p$	Calor específico	[J/kgK]
F	Fator adimensional do GCI	
h	Coefficiente de convecção do fluido	[W/m <sup>2</sup> K]
$R_{PE}$	Resistência de contato entre o isolante e o alumínio	[m <sup>2</sup> K/W]
$R_{AL}$	Resistência de contato entre os alumínios	[m <sup>2</sup> K/W]
D	Diâmetro	[m]
$u_m$	Velocidade média	[m/s]
Re	Número de Reynolds	
$f$	Fator de forma	
$Nu$	Número de Nusselt	
Pr	Número de Prandtl	
N	Newton	[N]
$T_s$	Temperatura da superfície	[°C]
R	Resistência elétrica	[Ω]
V	Tensão elétrica	[V]
W	Potência elétrica	[W]
i	Corrente elétrica	[A]
$V_{cel}$	Volume da célula	[m <sup>3</sup> ]
K	Kelvin	[K]
L	Litro	[L]
t	Tempo	[s]
$T_i$	Temperatura inicial	[°C]
$T_f$	Temperatura do fluido	[°C]
$T_s$	Temperatura da superfície	[°C]
$T_{fluido}$	Temperatura do fluido	[°C]
J	Joules	[J]
g	Gramas	[g]

### Símbolos gregos

$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	Diferença de temperatura	[°C]
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica	[Ns/m <sup>2</sup> ]

### Abreviaturas e acrônimos

PE	Polietileno
Al	Alumínio
SAE	Sociedade de Engenheiros da Mobilidade

UFRGS

GCI

DC

SI

CFD

Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

*Grid Convergence Index*

Corrente Alternada

Sistema Internacional de Unidades

*Computational fluid dynamics*

## SUMÁRIO

NOMENCLATURA .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	2
3. CASO DE ESTUDO.....	2
3.1 MODELO EXPERIMENTAL.....	3
3.2 MODELO NUMÉRICO .....	4
4. RESULTADOS .....	8
4.1 RESULTADO EXPERIMENTAL .....	8
4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS .....	9
5. CONCLUSÃO .....	14
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
ANEXO 1 .....	17
APÊNDICE 1 .....	19
APÊNDICE 2.....	20
APÊNDICE 3.....	22

## 1. INTRODUÇÃO

No início do século XX, era grande o interesse em veículos motorizados, principalmente em veículos elétricos. Naquela época, os veículos elétricos eram predominantes nas ruas, e não se conhece um idealizador desses equipamentos, pois muitos inventores contribuíram para o conceito. Entretanto, a partir de 1920, o interesse diminuiu, pois os veículos elétricos foram superados em velocidade máxima e autonomia pelos veículos providos de motores de combustão (CHAN, 2012).

Durante algumas décadas, os veículos elétricos permaneceram em esquecimento, até que, por volta de 1990, devido à crescente preocupação com o aumento da poluição relacionado ao transporte nas grandes cidades, a pesquisa e desenvolvimento de carros elétricos foi retomada. Como resultado desse desenvolvimento, a Toyota lançou em 1997 o primeiro carro híbrido produzido em massa.

Outro evento que contribuiu para o aumento da popularidade dos carros elétricos foi o anúncio pela Tesla Motors do primeiro modelo esportivo elétrico de luxo. O veículo apresenta uma autonomia semelhante aos carros de combustão esportivos, com uma única carga. A Tesla tornou-se a maior empresa automobilística da Califórnia e tem investido no desenvolvimento de veículos elétricos eficientes e de alto conteúdo tecnológico (MATULKA, 2014).

Um dos itens cruciais para os carros elétricos é o acumulador, cuja operação é caracterizada pelos ciclos de carga e descarga. Devido à resistência interna das células, a passagem de corrente provoca aquecimento por efeito Joule, e o efeito da operação prolongada em alta temperatura é a degradação das células.

Por isso, é necessário resfriar as baterias (SAITO *et al*, 2009) e, cada vez mais, células de íon lítio estão sendo desenvolvidas para funcionar com maior eficiência e menor necessidade de resfriamento, sendo ainda assim importante o desenvolvimento de sistemas de arrefecimento adequados para mantê-las à temperatura ideal de operação.

A categoria de veículos elétricos foi introduzida na Fórmula SAE em 2012. Trata-se da maior competição nacional de veículos desenvolvidos por grupos estudantis, caracterizada pela constante atualização dos requisitos técnicos dos protótipos. Consiste em uma competição com um regulamento desafiador para um aluno de graduação, e as equipes participam de provas estáticas e dinâmicas.

A UFRGS é representada na FSAE elétrico pela equipe e-Power UFRGS. Completando quatro anos de existência em 2021, a equipe que tem como objetivo o desenvolvimento de novas tecnologias, sendo a única equipe nacional (e a quarta no mundo) a se propor o desafio de desenvolver o próprio motor.

Como solução para o arrefecimento das baterias utilizadas nos carros da equipe, foi proposto o acoplamento das células em um bloco de alumínio dotado de passagens para permitir o escoamento de um fluido refrigerante.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo a realização de uma análise térmica do sistema de arrefecimento do banco de baterias da e-Power, visando ao futuro desenvolvimento de uma metodologia de projeto para esse dispositivo. O estudo foi realizado através do uso de modelos numérico e experimental. O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o *software ANSYS CFX*. O modelo experimental foi testado em situação de descarga, permitindo a obtenção de curvas de aquecimento das células e do bloco.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Os acumuladores utilizados em veículos elétricos necessitam de arrefecimento para que a temperatura das células seja mantida no patamar de maior eficiência e sempre abaixo da temperatura crítica, acima da qual pode ocorrer o incêndio do banco.

O acumulador utilizado pela equipe e-Power é composto por 48 células de íon lítio do fabricante DiNeng, modelo DNNCM-31 Ah (LiNiCoMnO<sub>2</sub>), revestidas com isolante elétrico feito de material polimérico. O banco é composto pela disposição das baterias em 12 setores com 4 células cada. A temperatura crítica de operação é 50 °C, enquanto o ponto de operação em maior eficiência é de 40 °C.

Para analisar a capacidade de dissipação de calor do sistema de arrefecimento proposto, neste trabalho foi utilizado um setor, composto de quatro células de íon lítio encamisadas em um bloco de alumínio. O bloco foi usinado com cinco furos, sendo quatro para o acoplamento das células e o quinto furo, localizado no centro do bloco, para o acoplamento de um tubo a ser conectado a um sistema de bombeamento de água. Essa proposta foi inspirada no princípio de funcionamento dos sistemas de arrefecimento utilizados nos modelos da Tesla Motors.

Para a realização do estudo, neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico de um setor do banco de baterias. O modelo foi implementado através de um pacote computacional de CFD para permitir a simulação de diferentes condições de operação. Para obtenção de dados experimentais que permitissem a validação do modelo, um teste do sistema foi realizado em uma bancada de laboratório.

## 3. CASO DE ESTUDO

Este estudo considerou uma montagem de um setor do banco de baterias dotado do sistema de arrefecimento proposto. O conjunto é composto por quatro células íon lítio, envoltas pelo bloco de alumínio. O bloco dispõe de cinco furos passantes, quatro para as células e o quinto para montagem de um tubo metálico para o escoamento de um fluido refrigerante.

A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da montagem, enquanto a Tabela 1 mostra a lista de componentes. Neste trabalho, o bloco e o tubo são de alumínio. O material utilizado para o isolamento elétrico das células não foi identificado, pelo que as propriedades do polietileno foram consideradas onde necessário.

Para o estabelecimento das condições de operação e de contorno foram consideradas as condições estimadas durante a competição. Assim, o fluido refrigerante considerado é a água, com temperatura variando de 10°C a 40°C. Dois valores de vazão foram considerados na simulação, 1,67 L/min e 4,17 L/min, correspondentes à vazão fornecida por bombas de água veiculares disponíveis comercialmente. A influência da temperatura inicial do conjunto também foi analisada e foi variada na mesma faixa que a temperatura do fluido. Considerando a falta de informação sobre as propriedades do revestimento das células e da qualidade do contato entre elas e o bloco de alumínio, bem como do contato entre o bloco e o tubo, a resistência de contato nessas interfaces foi considerada no modelo.

Para este estudo foram desenvolvidos dois modelos, sendo um numérico, implementado através do *software ANSYS CFX*, e um experimental, para obtenção de dados para validação do modelo numérico. Esses modelos são descritos a seguir.

Figura 1 – Geometria do setor estudado

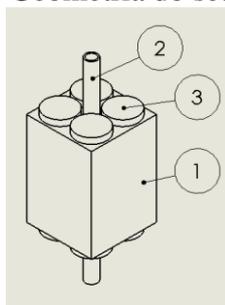


Tabela 1 – Lista de componentes

Número do componente	Nome do Componente	Quantidade
1	Bloco	1
2	Tubo	1
3	Célula de íon lítio	4

### 3.1 MODELO EXPERIMENTAL

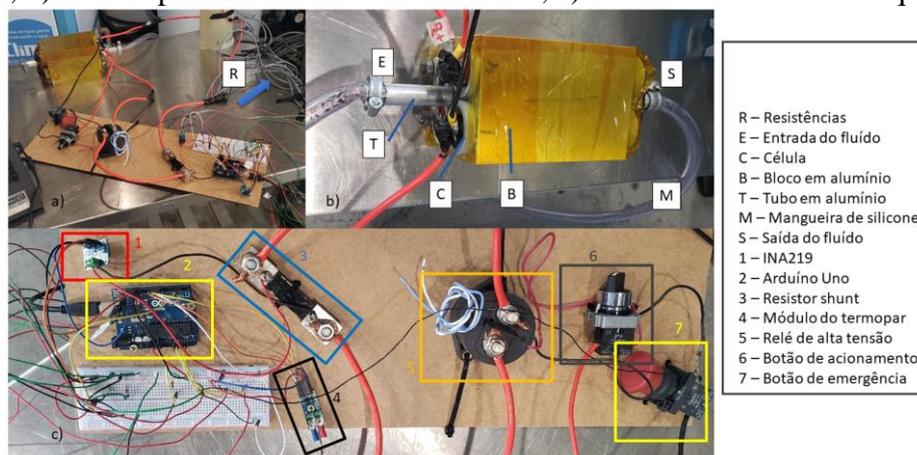
Uma bancada experimental foi elaborada a fim de se obter dados da temperatura das células durante uma operação de descarga para comparação com os valores calculados com o modelo computacional. A montagem consistiu de quatro células (um setor) encamisadas pelo sistema de arrefecimento, como mostrado na Figura 2.

Para o experimento, o bloco e tubo foram usinados em alumínio 6061 T6. A circulação de água através do tubo foi promovida através de uma unidade de arrefecimento de moldes de injeção, a uma taxa de 128,3 L/min com temperatura controlada na faixa de 5°C a 30 °C.

Durante o ensaio, realizado em triplicata, foi feita a aquisição do sinal de sensores de temperatura posicionados no topo das células, na superfície superior do bloco e na seção de alimentação da água. Para tanto, foi utilizada uma placa de prototipagem eletrônica programável Arduino.

A temperatura de entrada do fluido de arrefecimento foi estabelecida em 10 °C. As células foram conectadas em um circuito elétrico construído para simular uma situação crítica de descarga do setor, correspondente ao acionamento de um motor elétrico em uma condição de competição, com demanda de 1000W de potência,

Figura 2 – a) bancada, com os equipamentos de aquisição, ainda sem os sensores montados, b) vista superior do setor com as células, c) detalhe do circuito de aquisição.



Todos os sensores do sistema foram integrados utilizando uma placa Arduino Uno. Os sensores foram conectados seguindo a especificação do fabricante, e o código elaborado para o experimento pode ser consultado no APÊNDICE 2. Todos os sensores utilizados foram calibrados e suas curvas de calibração e incertezas encontram-se no APÊNDICE 3. Na Tabela 2 são apresentadas as características dos sensores utilizados e suas funções.

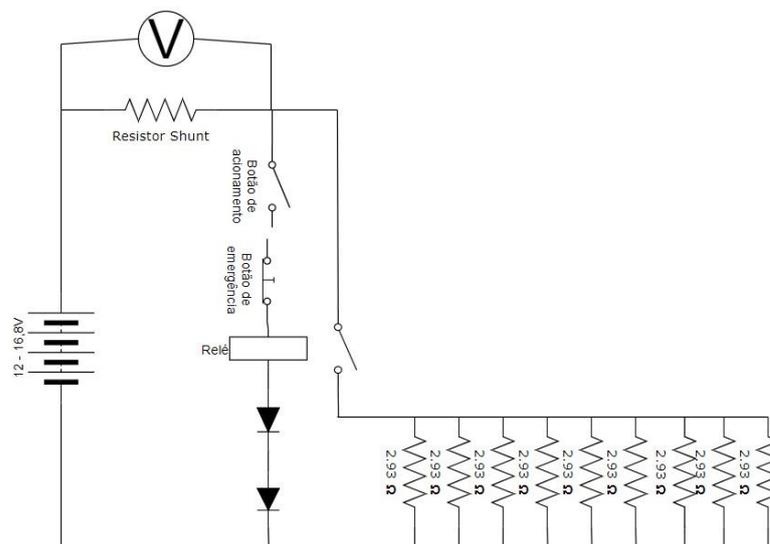
Tabela 2 – Sensores utilizados na bancada de teste

Sensor	Quantidade	Função	Localização na bancada
DHT22	1	Temperatura e umidade do ambiente	Placa de ensaio
LM235Z	4	Temperatura de cada célula	Na superfície superior de cada célula
Termopar MAX6675	1	Temperatura do bloco	Superfície superior do bloco
INA 219	1	Medições de corrente e tensão elétrica das células	Entre o Resistor Shunt e a Placa de ensaio

A bancada e o sistema de água foram conectados utilizando-se uma mangueira de silicone atóxica. Para isolamento térmico foi utilizada fita Kapton (Poliimida) em toda a superfície externa do bloco.

O diagrama do circuito elétrico montado para o experimento é apresentado na Figura 3. A tensão nos terminais do setor de quatro células pode variar de 12V a 16,8V. O circuito foi dotado de um botão de acionamento e outro de emergência. Um resistor do tipo *shunt* foi utilizado para obtenção da corrente elétrica a partir da medição da queda de tensão. Um relé de alta tensão foi utilizado para alimentar o circuito das cargas, o qual era composto de nove resistências em paralelo de  $2,93\Omega$  cada, de modo a simular um motor elétrico veicular.

Figura 3 – Circuito elétrico do experimento



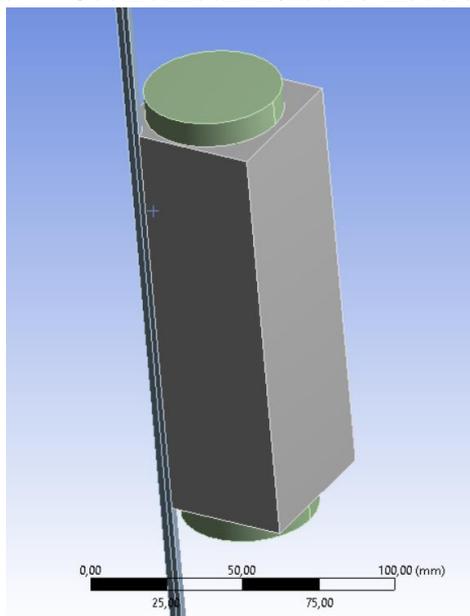
### 3.2 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi desenvolvido aplicando-se o método de volumes finitos com o uso do pacote computacional ANSYS® *Workbench CFX*. Considerando a simetria do problema, o modelo geométrico considerado corresponde a um quarto do volume do setor, contendo uma

célula de bateria envolta pelo bloco de alumínio e um quarto da circunferência do tubo, como mostrado na Figura 4.

Para avaliação da dissipação de calor da célula pelo bloco metálico, foi considerada a condução transiente de calor através do sólido. Foi admitida geração interna localizada uniforme no interior da célula e considerada a descontinuidade dos materiais através da aplicação de resistências de contato. Calor é dissipado por convecção na superfície interna do tubo. A variação da temperatura do fluido refrigerante foi desconsiderada, o que permitiu o desacoplamento do problema de transferência de calor no escoamento.

Figura 4 – Geometria analisada no modelo numérico



A condução de calor no conjunto é governada pela equação geral de condução:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_C = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Na Equação (1),  $q_C$  é a taxa de calor gerada localmente. Essa taxa é nula no bloco de alumínio e na parede do tubo, mas resulta do efeito Joule nas células, sendo determinada por:

$$q_C = \frac{R \cdot I^2}{V_{cel}} \quad (2)$$

Como condições de fronteira, todas as superfícies externas são consideradas adiabáticas, exceto a superfície correspondente à parede interna do tubo, onde a condição de transferência de calor por convecção foi considerada:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_s = h(T_s - T_{fluido}) \quad (3)$$

O coeficiente transferência de calor por convecção é obtido a partir da vazão e das propriedades do fluido por:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (4)$$

Na Equação (4), o número de Nusselt é obtido considerando escoamento turbulento em um duto, utilizando a correlação de Gnielinski, válida para uma extensa faixa de valores do número de Reynolds e do número de Prandtl:

$$Nu = \frac{(f/8)*(Re-1000)*Pr}{1+12,7*(f/8)^{1/2}*(Pr^{2/3}-1)} \quad 0,5 < Pr < 2000 \text{ e } 10^4 < Re < 5 \times 10^6 \quad (5)$$

Na aplicação da Equação (5), o número de Prandtl foi obtido de tabelas de propriedades da água (INCROERA, 2016), apresentadas no ANEXO 1. A velocidade do escoamento foi calculada em função da vazão, sendo o número de Reynolds baseado no diâmetro interno do tubo e o fator  $f$  calculado por meio da correlação de Petukhov, Eq.(7):

$$Re = \frac{\rho * u_m * D}{\mu} \quad (6)$$

$$f = (0,790 * \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad 3000 \lesssim Re \lesssim 5 \times 10^6 \quad (7)$$

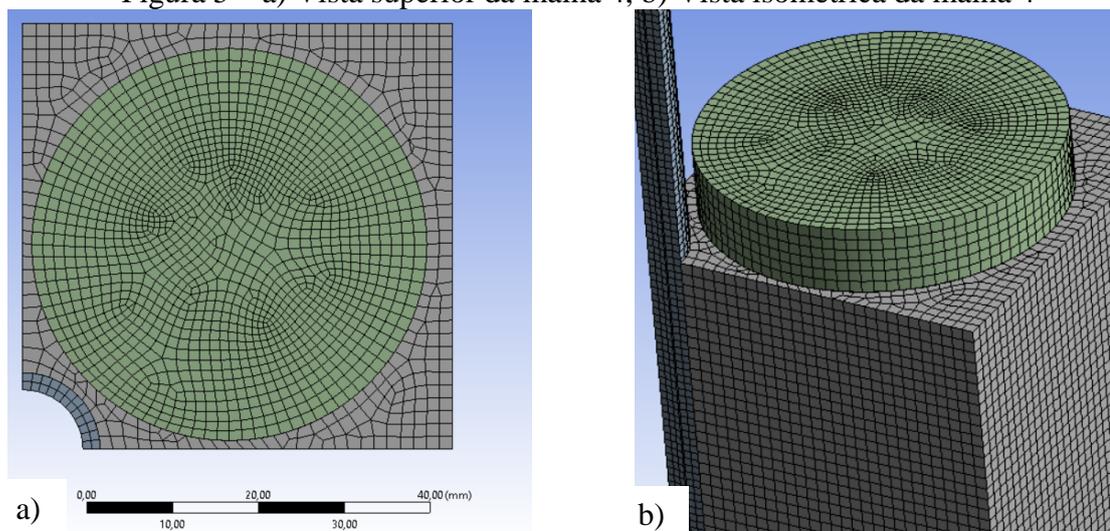
Neste trabalho foi verificado um valor do número de Reynolds menor que o limite inferior da faixa de validade das correlações. Ainda assim, foi considerado que não é esperada a ocorrência de um escoamento laminar no interior dos dutos e optou-se por utilizar a correlação de Gnielinski em todos os cálculos do coeficiente de convecção, uma vez que a utilização de uma correlação correspondente a escoamento laminar levaria à obtenção de um valor subestimado do coeficiente de convecção.

Para obtenção da evolução do campo de temperatura na célula e no bloco de alumínio foi utilizado o *software* CFX, seguindo a configuração padrão para integração implícita da equação de energia pelo método de Euler reverso de segunda ordem. Como condição inicial foi admitida uma temperatura uniforme prescrita em todo o domínio de cálculo.

Quatro malhas contendo elementos tetraédricos e majoritariamente hexaédricos foram geradas através do pré-processador *Meshing* da ANSYS para melhor representar a geometria, que contém fronteiras curvas. Na Figura 5 são apresentadas vistas da malha utilizada nos cálculos, com número de células definido a partir do teste de independência da malha. Na preparação das malhas, buscou-se que os elementos tivessem baixas razão de aspecto e obliquidade. Na construção da malha final foram aplicadas as condições de tamanho de elemento a cada componente, sendo 1,5 mm para célula e para o bloco, e 1 mm para o tubo.

A partir da geometria apresentada é gerada a malha do modelo. O CFX suporta os elementos de tipo tetraédricos, piramidais, prismáticos e hexagonais. O tipo de elemento e características dos elementos são tão importantes quanto o seu tamanho característico ou mesmo a metodologia de resolução. Isto pois, no CFX, o volume de controle é gerado ao redor de cada nó. Foi atentado para que a malha gerada fosse predominantemente hexaédrica de alta qualidade, e que os elementos possuíssem baixo nível de razão de aspecto e baixo nível de obliquidade. Para condição final (após convergência de malha) são aplicadas as condições de tamanho de elemento a cada componente: 1,5 mm para célula e para o bloco, e 1 mm para o tubo.

Figura 5 – a) Vista superior da malha 4, b) Vista isométrica da malha 4



Para avaliação da independência da malha foi aplicado o índice de convergência de malha (GCI - *grid convergence index*) de Roache (1994), que permite obter uma aproximação assintótica da incerteza de malhas no processo de refinamento.

No processo de refinamento para a obtenção da malha de melhor relação qualidade/custo computacional foram considerados os valores mais conservadores dos parâmetros propostos em Roache (1994). As características das malhas testadas são apresentadas na Tabela 3. Na Tabela 4 pode-se verificar o resultado comparativo para o GCI entre as 4 malhas avaliadas.

Tabela 3 – Características das malhas durante o refinamento.

	Tamanho do elemento (mm)	Nº de nós	Comprimento característico médio (mm)
<b>Malha 1</b>	5	20411	0,55
<b>Malha 2</b>	4	29499	0,50
<b>Malha 3</b>	2,5	86630	0,36
<b>Malha 4</b>	1,5	224102	0,30

Tabela 4 – Resultados do GCI

	Erro relativo	Fator de refinamento	GCI
<b>4-3</b>	0,0010	1,21	0,0146
<b>3-2</b>	0,0025	1,38	0,0197
<b>2-1</b>	0,0081	1,10	0,2304

O GCI da comparação das malhas 3 e 4 resultou nos melhores valores, sendo o GCI de 0,0146 aceito como critério de parada do refinamento. O cálculo do GCI considerou a variação do resultado de temperatura de equilíbrio em 3 diferentes pontos do domínio. Como resultado desta análise, a malha 4 foi escolhida para ser utilizada na continuação do trabalho. A malha 4 é composta predominantemente por elementos hexaédricos, apresentando 202701 elementos e 224102 nós. Soluções foram obtidas utilizando passos de tempo de 10, 5, 2 e 1 segundos para solução da equação de calor em regime transiente. Tendo em vista que um método de integração da equação governante é implícito, e que a discrepância dos resultados obtidos com os dois últimos passos de tempo testados não foi significativa, optou-se por não testar passos de tempo menores, tendo-se adotado o passo de tempo de 1s nas simulações realizadas neste trabalho.

O modelo foi dividido em três subdomínios: o tubo, o bloco e a célula. A existência das interfaces foi considerada pelo estabelecimento de uma resistência de contato na fronteira dos componentes. Na Tabela 5 são apresentadas as propriedades dos materiais e o valor da resistência de contato entre os subdomínios.

Tabela 5 – Propriedades dos domínios do modelo.

Propriedades	Célula	Tubo	Bloco
Conductividade térmica [W/mK]	28 <sup>1</sup>	237 <sup>2</sup>	237 <sup>2</sup>
Calor específico [J/gK]	1,28 <sup>1</sup>	0,903 <sup>2</sup>	0,903 <sup>2</sup>
Resistência de contato entre Al-Al [m <sup>2</sup> K/W]	-	0,0004545 <sup>3</sup>	0,0004545 <sup>3</sup>
Resistência de contato entre Al-PE [m <sup>2</sup> K/W]	0,0025 <sup>3</sup>	-	0,0025 <sup>3</sup>

Fonte: <sup>1</sup> Maleki, 1999; <sup>2</sup> Biblioteca de materiais do ANSYS CFX; <sup>3</sup> Babu, 2015.

No subdomínio da célula foi aplicada uma geração volumétrica de 18,396 kW/m<sup>3</sup> (ver Equação 2). Na integração numérica foi adotado como critério de convergência um residual máximo de 10<sup>-5</sup> (raiz quadrática média). Os tempos de simulação adotados neste trabalho variaram de 1500s, para a simulação nas condições do teste do setor, a 1800s, nas simulações realizadas para o estudo da influência das condições operacionais sobre o desempenho do sistema de arrefecimento.

## 4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho. No primeiro tópico são apresentados os resultados do experimento. Em seguida, os resultados obtidos na modelagem numérica são analisados, primeiro, considerando a comparação dos resultados calculados com os dados do teste e, após, os resultados da simulação do sistema de arrefecimento para análise do impacto da variação de parâmetros operacionais.

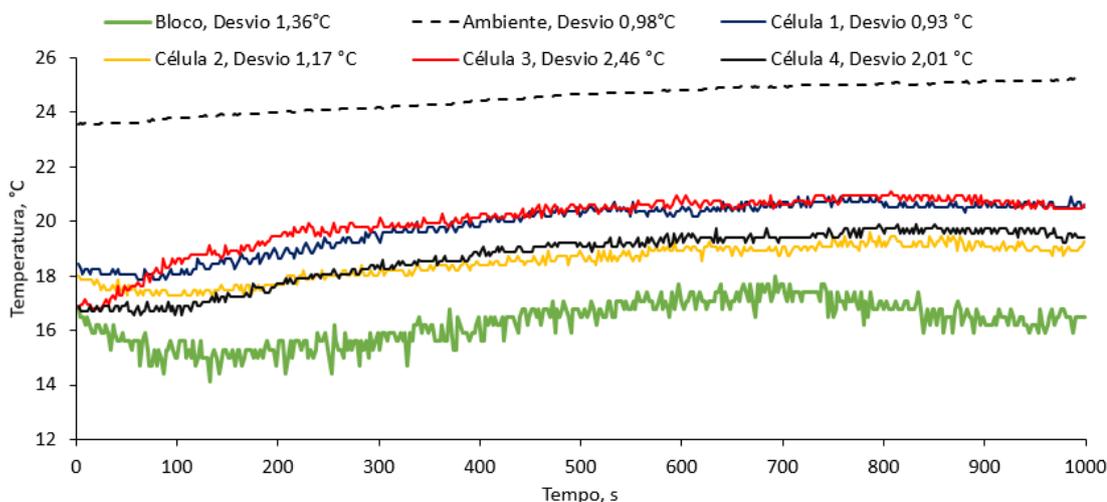
### 4.1 RESULTADO EXPERIMENTAL

O ensaio foi realizado em triplicata, para um tempo total de 960s, e a evolução da temperatura média dos três testes é apresentada na Figura 6. As medidas referem-se ao ponto central na superfície superior de cada célula, além de um ponto na superfície do bloco de alumínio e à temperatura do ambiente.

Pode ser observado que a temperatura do ambiente se manteve aproximadamente constante para o propósito deste trabalho. A temperatura de cada célula e do bloco tenderam ao valor de equilíbrio após 900 segundos de ensaio. As células estabilizaram a aproximadamente 19,8 °C e o bloco estabilizou a aproximadamente 16,5°C.

Foi observado um ruído referente à aquisição dos dados, sendo mais intenso no termopar localizado no bloco. Essa diferença foi observada no uso dos sensores diferentes, pois para a medição da temperatura das células foram utilizados os sensores LM235Z e para a da superfície do bloco foi usado o termopar. A maior sensibilidade do sensor de temperatura do bloco permitiu a detecção de pequenas oscilações na temperatura, conforme pode ser observado no APÊNDICE 3, o que explica o maior ruído verificado. Foi observada uma oscilação de ± 0,5°C na medição realizada pelo sensor de temperatura do bloco, a qual pode estar relacionada a uma variação de ± 1°C observada na temperatura da água de resfriamento durante o teste.

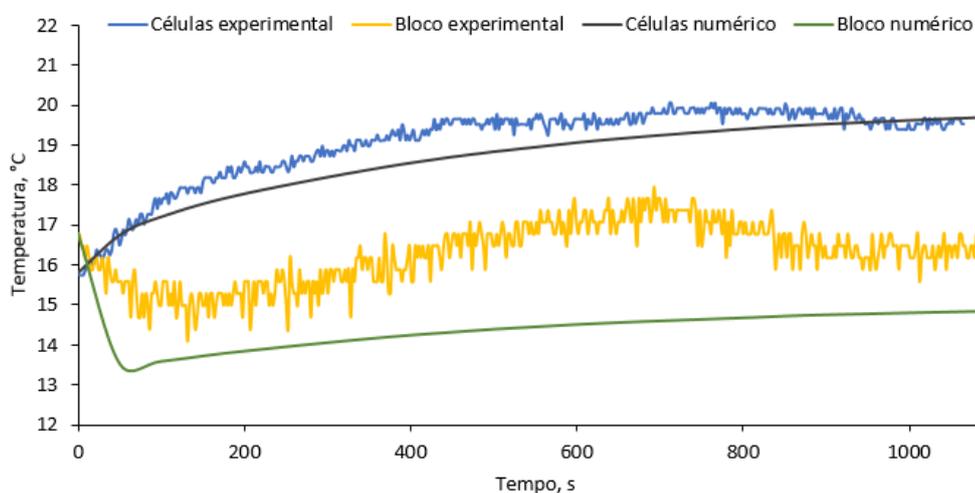
Figura 6 – Evolução da temperatura dos pontos medidos no experimento.



## 4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

Primeiramente, a simulação do comportamento das células e do bloco de resfriamento foi realizada para a condição do ensaio na bancada de teste a fim de se realizar a comparação com os resultados experimentais. A Figura 7 mostra a evolução da temperatura no ponto central do topo da célula e na superfície do bloco. O resultado experimental da temperatura da célula corresponde à média da temperatura instantânea dos quatro pontos no setor usado no teste.

Figura 7 – Evolução das temperaturas para o experimental e numérico análogo.



Pode ser observado que a evolução da temperatura calculada da célula tem boa concordância com a temperatura média das quatro células obtida no experimento. O resultado do modelo numérico, para as condições do experimento. Quando a temperatura medida na superfície do bloco é considerada, verifica-se inicialmente, a temperatura do bloco diminui, atingindo um valor mínimo aproximadamente após 150s após o início do teste, quando então o bloco passa a ser aquecido e a temperatura aumenta. Por volta de aproximadamente 700s a partir do início do teste, a temperatura do bloco diminui rapidamente de 17,5°C para aproximadamente 16°C, mantendo-se aproximadamente constante nesse patamar até o final do teste.

A queda de temperatura inicial é explicada pela elevada vazão de água em baixa temperatura no experimento, que provoca uma elevada taxa de dissipação de calor do bloco na superfície do tubo antes que a temperatura da célula seja tão elevada que a taxa de calor conduzida da célula para o bloco compense a perda de calor para a água. Conforme a temperatura da célula aumenta, a taxa de calor conduzida da célula para o bloco aumenta, enquanto a dissipação por convecção na parede do tubo se mantém constante, o que justifica o aumento da temperatura do bloco. A inversão da tendência de aumento da temperatura do bloco por volta dos 700s depois do início do teste pode estar relacionada ao aumento da perda de calor do bloco para o ambiente pelo aumento de temperatura da superfície. Como a temperatura da célula continua aumentando nesse instante, o bloco eventualmente atinge uma condição de balanço das taxas de calor a partir da qual sua temperatura é estabilizada.

Na comparação da temperatura do bloco calculada com o modelo numérico, verifica-se que o modelo reproduz qualitativamente o comportamento observado no experimento, de um resfriamento inicial seguido de uma rampa de aquecimento. O tempo de queda da temperatura obtido pelo modelo é mais curto que o do experimento, e a temperatura mínima calculada é menor do que a medida. Esse resultado indica que o modelo superestima a perda de calor do bloco por convecção na parede interna do tubo.

A evolução da temperatura calculada após o resfriamento inicial está de acordo com o comportamento observado no experimento, entretanto pode-se observar uma maior inércia térmica no modelo, com a temperatura do bloco aumentando lentamente, em comparação ao resultado experimental, e acarretando um tempo mais longo para que o bloco atinja a temperatura de equilíbrio. Esse resultado corrobora a hipótese de o coeficiente de transferência de calor por convecção estar superestimado e indica a necessidade de se conhecer adequadamente as propriedades dos materiais.

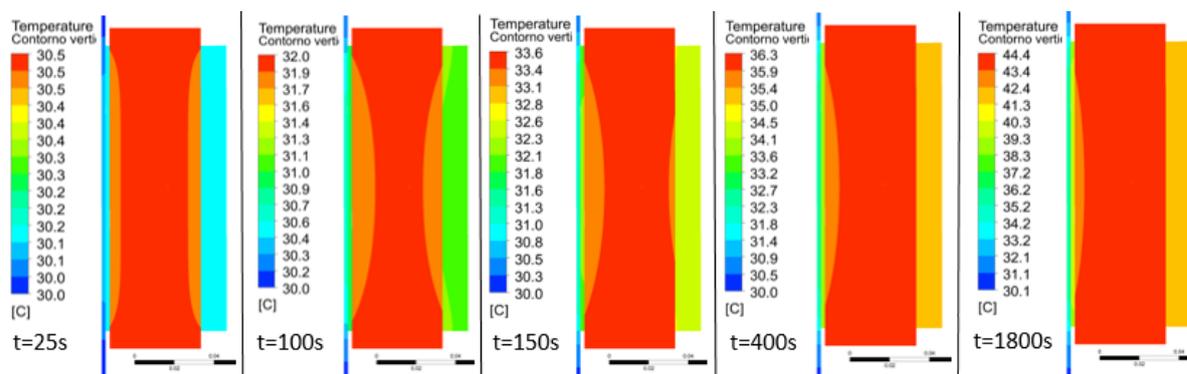
Percebe-se que o modelo reproduz qualitativamente o comportamento da temperatura da célula e do bloco observado no experimento. Uma análise mais profunda do modelo requer a realização de mais testes, em diferentes condições de operação. Contudo, esse resultado é considerado promissor e, para o propósito deste trabalho, considera-se que o modelo pode ser utilizado para a simulação do sistema de arrefecimento na continuação deste estudo.

Após a validação do modelo, o mesmo foi aplicado com o objetivo de verificar como o sistema se comporta quando são alteradas as condições de operação. Foram consideradas variações na vazão e na temperatura da água de resfriamento, e na temperatura inicial do sistema. Adicionalmente, foram feitas simulações visando a analisar a influência da existência de resistências de contato na interface dos subdomínios.

Considerando as condições esperadas numa situação de competição, foram adotados os seguintes valores de referência para os parâmetros de simulação: a) temperatura inicial do conjunto de 30°C; b) vazão de água de 4,17 L/min; e c) taxa de geração distribuída nas células de 18,396 kW/m<sup>3</sup>. As propriedades dos materiais são as indicadas na Tabela 5.

A Figura 8 mostra a evolução do campo de temperatura para a condição de referência, em um plano de corte que contém os eixos do tubo e da célula, sendo portanto diagonal à seção transversal da geometria utilizada no modelo numérico.

Figura 8 – Evolução do campo de temperatura no plano vertical que contém os eixos do tubo e da célula.



Pode-se verificar que a temperatura no interior da célula se eleva rapidamente e de modo uniforme, sem se identificar gradientes de temperatura acentuados. O mesmo comportamento pode ser observado na porção de bloco de alumínio na extremidade externa do conjunto, mais afastada do eixo do tubo. Esse resultado sugere a existência de uma resistência à condução no sólido que é baixa em comparação à resistência à condução através das interfaces entre os subdomínios, e é interessante por indicar a possibilidade de monitoramento da temperatura da célula através de sensores instalados na sua superfície.

Para a condição de referência, a temperatura da célula estabiliza em torno de 44°C, acima da temperatura ideal em que a célula opera com maior eficiência, que é de 40°C, mas abaixo da temperatura crítica de 50°C, que pode provocar incêndio do banco de baterias.

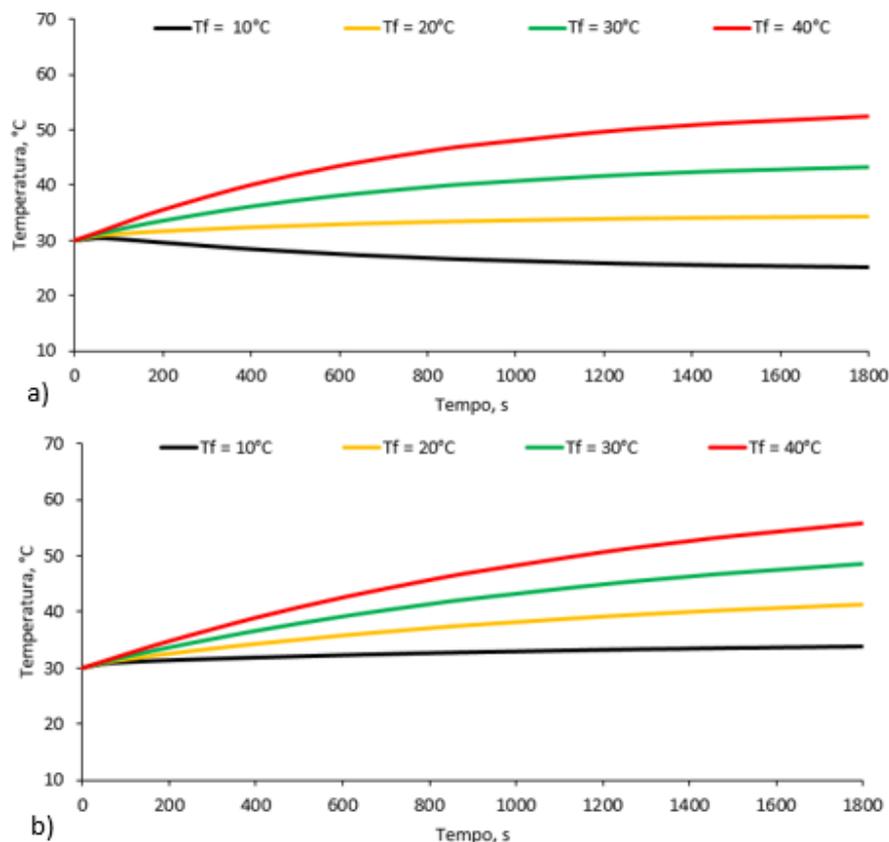
A previsão da temperatura do bloco de alumínio é importante em função da variação dimensional provocada pelo aquecimento, que pode aumentar a interferência entre os componentes e levar à danificação da camada de isolante da célula, além de afetar as resistências de contato.

A Figura 9 apresenta os resultados da simulação da evolução da temperatura da célula variando-se a vazão e a temperatura da água de refrigeração.

Pode-se observar que a temperatura de equilíbrio da célula aumenta com o aumento da temperatura da água e com a diminuição da vazão. Esse resultado era esperado, uma vez que as ambas as condições levam à diminuição da taxa de dissipação de calor por convecção para o fluido refrigerante.

Verifica-se que para garantir a operação segura, a temperatura da água deve ser mantida abaixo de 30°C, para a vazão de 4,17 L/min. No caso da vazão menor, a temperatura de equilíbrio não foi atingida no tempo de simulação de 1800s. Entretanto, considerando um tempo de competição não superior a 2700s, há que se verificar se as células poderiam atingir a temperatura crítica.

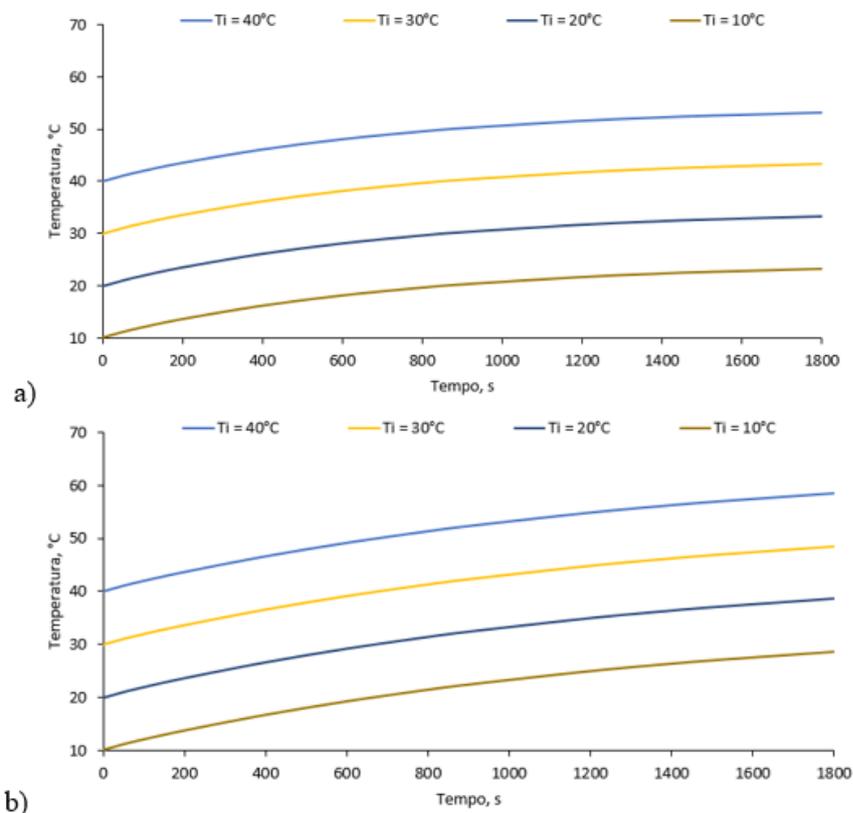
Figura 9 – Evolução da temperatura da célula em função da temperatura do fluido para as vazões de 4,17 L/min (a) e 1,67 L/min (b).



A influência da temperatura inicial do conjunto é apresentada na Figura 10. Foram consideradas as temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C e 40°C. A temperatura do fluido foi considerada igual à do conjunto, em cada caso, visando aproximar a condição da competição.

Pode-se observar que a temperatura da célula ultrapassa a temperatura crítica mesmo para a maior vazão quando a temperatura inicial é de 40°C. Para a vazão de 1,67 L/min, a temperatura crítica é atingida em um tempo inferior ao de uma prova já para a temperatura de 30°C. Como a condição de temperatura ambiente e de fluido refrigerante a 30°C é facilmente encontrada nas competições nacionais e internacionais, esse resultado aponta para a impossibilidade de utilização de bombas de menor vazão.

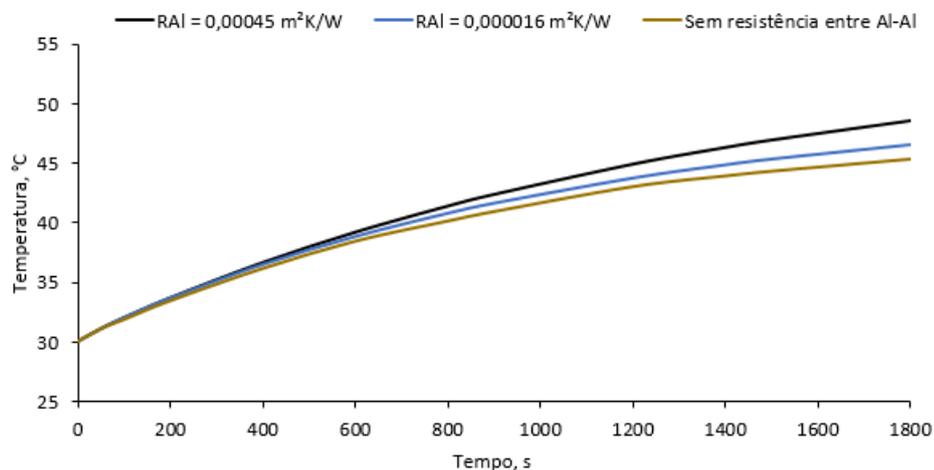
Figura 10 – Evolução da temperatura da célula com diferentes temperaturas iniciais para as vazões de 4,17 L/min (a) e 1,67 L/min (b).



Completando este estudo, também foi avaliada o impacto da variação das resistências de contato sobre a temperatura da célula.

Na Figura 11 são apresentados os resultados da simulação considerando a variação da variação das resistências de contato entre alumínio e alumínio (tubo e bloco). Nesse caso a análise foi realizada com a vazão mais crítica, de 1,67 L/min, considerando a maior facilidade de obtenção de bombas de menor porte pela equipe.

Figura 11 – Evolução da temperatura da célula no seu eixo central em função da resistência de contato entre o bloco e o tubo.

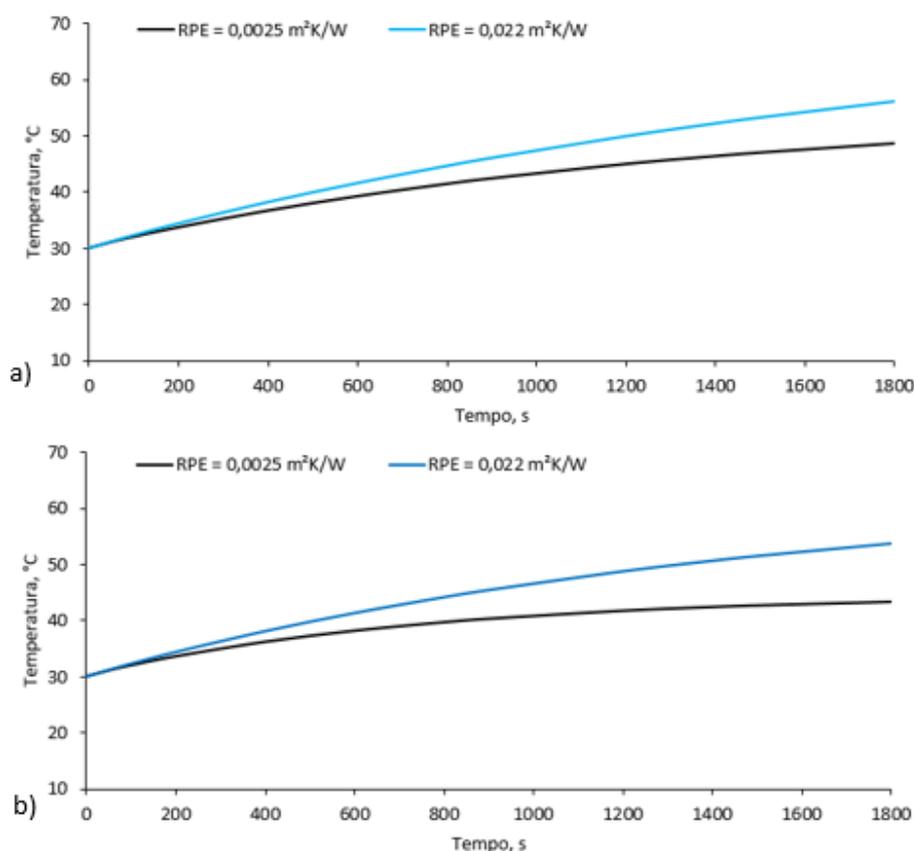


Verifica-se que a diminuição da resistência de contato entre o bloco e o tubo favorece a diminuição da temperatura de equilíbrio da célula. Esse resultado era esperado, uma vez que a diminuição das resistências de contato diminui a resistência total de transferência de calor da célula para o fluido refrigerante. É interessante notar que para essa vazão mais baixa é possível aumentar a margem de segurança em relação à temperatura crítica se a resistência de contato entre bloco e tubo puder ser anulada, o que é possível de se conseguir pela fabricação do bloco com o tubo integrado, formando uma peça única.

A comparação dos resultados da simulação com variação da resistência de contato entre bloco e célula é apresentada na Figura 12.

Os resultados obtidos indicam que, da mesma forma que no caso anterior, é necessário diminuir a resistência de contato entre o bloco e a célula para garantir a operação segura, mesmo no caso de maior vazão.

Figura 12 – Evolução da temperatura da célula em função da resistência de contato entre o bloco e a célula para as vazões de 1,67 L/min (a) e 4,17 L/min (b).



## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram desenvolvidos dois modelos, um numérico utilizando um *software de CFD* e um experimental, com o objetivo de estudar a influência de condições de operação sobre o desempenho de um sistema de arrefecimento proposto para o banco de baterias de um veículo elétrico de competição tipo Fórmula SAE.

O modelo experimental utilizou um setor de quatro células do banco de baterias da equipe e-Power UFRGS encamisadas em um bloco metálico dotado de um tubo para passagem de água. O teste de descarga foi realizado para obtenção da curva de aquecimento das células.

O modelo numérico foi implementado através do pacote computacional CFX. A equação do balanço de energia transiente no sólido é resolvida para um modelo tridimensional do setor. Após a validação do modelo pela comparação de resultados calculados com os dados obtidos no experimento, simulações foram realizadas para estudar a influência das condições operacionais sobre o desempenho do sistema de arrefecimento proposto, avaliando-se a garantia de operação segura das células. A influência da vazão e temperatura do fluido refrigerante, da temperatura inicial do conjunto e da existência de resistências de contato na interface dos componentes da montagem foi considerada.

As principais conclusões do trabalho são que: a) existe viabilidade de desenvolvimento do projeto do sistema de arrefecimento do banco de baterias com uso de bombas de água disponíveis comercialmente; b) a utilização de bombas menores, visando à diminuição do peso do protótipo requer que o bloco seja fabricado de modo a se minimizar as resistências de condução nas interfaces entre o bloco e as células e o bloco e o tubo.

Para continuação do trabalho é sugerido desenvolver uma bancada de testes que possibilite realizar ensaios experimentais numa ampla faixa de condições operacionais e aprimorar a modelagem das propriedades dos materiais. Também é sugerido o desenvolvimento do projeto de fabricação do bloco com o duto usinado, formando uma única peça.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Saito, M., ns, wa. “**Battery temperature unevenness suppressing power supply**”, Sanyo Electric Co Ltd. Patente americana US8507121B2 United States, 2009. Disponível em: < <https://patents.google.com/patent/US8507121/zh> >. Acessado no dia 10/03/2021.
- ANSYS, Inc. “**ANSYS CFX Solver Theroy Guide**”, Canonsburg, PA, August 2017.
- Incropera, Frank P. dpd, tlb, asl; “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, Grupo Editorial Nacional LTC, 7ª edição, 2016.
- MATULKA, Rebecca; “**The History of the Electric Car**”, ENERGY.GOV, 15 setembro de 2014. Disponível em: < <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> >. Acessado no dia 20/02/2021.
- CHAN, C. C.; “**The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned**”, IEEE, p. 206-212, 01 de janeiro de 2013. Disponível em: < [https://www.eee.hku.hk/doc/ccchan/CC\\_Chan\\_IEEE%20Proceedings%20The%20rise%20&%20fall%20of%20EVs.pdf](https://www.eee.hku.hk/doc/ccchan/CC_Chan_IEEE%20Proceedings%20The%20rise%20&%20fall%20of%20EVs.pdf) >. Acessado no dia 20/02/2021.
- Babu, Karthik N.; “**Thermal Contact Resistance: Experiments and Simulation**”, Chalmers University of Technology, Master`s thesis in Automotive Engineering.
- Solidworks Help; “**Resistência térmica de contato**”, Dassault systemes INC, 2021. Disponível em: < [http://help.solidworks.com/2021/portuguese-brazilian/solidworks/cworks/c\\_Thermal\\_Contact\\_Resistance\\_contact\\_analysis.htm](http://help.solidworks.com/2021/portuguese-brazilian/solidworks/cworks/c_Thermal_Contact_Resistance_contact_analysis.htm) >. Acessado no dia 22/05/2021.
- Roache, P.J.; “**Perspective: A Method for Uniform Reporting od Grid Refinement Studies**”, Ecodynamics Research Associates, Inc, 1994.
- Maleki, H., sah., jrs, rbd, hw; “**Thermal Properties of Lithium-Ion Battery and Componenets**”, Journal oh The Eletonchemical Societ, March 1999. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/235000207\\_Thermal\\_Properties\\_of\\_Lithium-Ion\\_Battery\\_and\\_Components?enrichId=rgreq-c1e4de54f11c997b7db383b01e20820e-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzNTAwMDIwNztBUzoxOTI3NzEzMDg0ODI1NjBAMTQyMjk3MTY2OTk2Nw%3D%3D&el=1\\_x\\_2&\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/235000207_Thermal_Properties_of_Lithium-Ion_Battery_and_Components?enrichId=rgreq-c1e4de54f11c997b7db383b01e20820e-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzNTAwMDIwNztBUzoxOTI3NzEzMDg0ODI1NjBAMTQyMjk3MTY2OTk2Nw%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf) >. Acessado no dia 22/05/2021.
- NASA/NPARC; “**Examining Spatial (Grid) Convergence**”, NPARC Alliance CFD Verification an Validation, 10/02/2021. Disponível em: < <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html> >. Acessado no dia 30/05/2021.



Figura 15 – Tabela A.5 Propriedades termofísicas de fluidos saturados, página 638 da 4 edição.

**TABELA A.5 Propriedades termofísicas de fluidos saturados<sup>a</sup>**

*Líquidos Saturados*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/(kg · K))	$\mu \cdot 10^2$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/(m · K))	$\alpha \cdot 10^7$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$	$\beta \cdot 10^3$ (K <sup>-1</sup> )
<b>Etilenoglicol [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>]</b>								
273	1130,8	2,294	6,51	57,6	242	0,933	617	0,65
280	1125,8	2,323	4,20	37,3	244	0,933	400	0,65
290	1118,8	2,368	2,47	22,1	248	0,936	236	0,65
300	1114,4	2,415	1,57	14,1	252	0,939	151	0,65
310	1103,7	2,460	1,07	9,65	255	0,939	103	0,65
320	1096,2	2,505	0,757	6,91	258	0,940	73,5	0,65
330	1089,5	2,549	0,561	5,15	260	0,936	55,0	0,65
340	1083,8	2,592	0,431	3,98	261	0,929	42,8	0,65
350	1079,0	2,637	0,342	3,17	261	0,917	34,6	0,65
360	1074,0	2,682	0,278	2,59	261	0,906	28,6	0,65
370	1066,7	2,728	0,228	2,14	262	0,900	23,7	0,65
373	1058,5	2,742	0,215	2,03	263	0,906	22,4	0,65
<b>Óleo de Motor (Não Usado)</b>								
273	899,1	1,796	385	4280	147	0,910	47000	0,70
280	895,3	1,827	217	2430	144	0,880	27500	0,70
290	890,0	1,868	99,9	1120	145	0,872	12900	0,70
300	884,1	1,909	48,6	550	145	0,859	6400	0,70
310	877,9	1,951	25,3	288	145	0,847	3400	0,70
320	871,8	1,993	14,1	161	143	0,823	1965	0,70
330	865,8	2,035	8,36	96,6	141	0,800	1205	0,70
340	859,9	2,076	5,31	61,7	139	0,779	793	0,70

Figura 16 – Tabela A.6 Propriedades termofísicas da água saturada, página 640 da 4 edição.

**TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada<sup>a</sup>**

Temperatura, $T$ (K)	Pressão, $p$ (bar) <sup>b</sup>	Volume Específico (m <sup>3</sup> /kg)		Calor de Vaporização, $h_{fg}$ (kJ/kg)		Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m <sup>2</sup> )		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K <sup>-1</sup> )	Temperatura, $T$ (K)
		$v_f \cdot 10^3$	$v_g$	$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_s \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_s \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	$Pr_f$	$Pr_g$					
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15	
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275	
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280	
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285	
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290	
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295	
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300	
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305	
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310	
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315	
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320	
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325	
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330	
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335	
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340	

**APÊNDICE 1**

Desenhos técnicos dos componentes utilizados no estudo.

Figura 17 – Desenho Técnico Célula de Íon Lítio

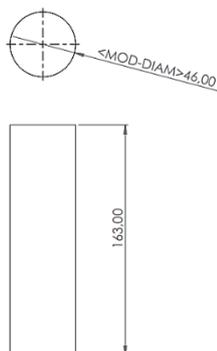


Figura 18 – Desenho técnico do tubo

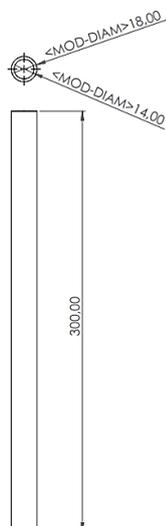
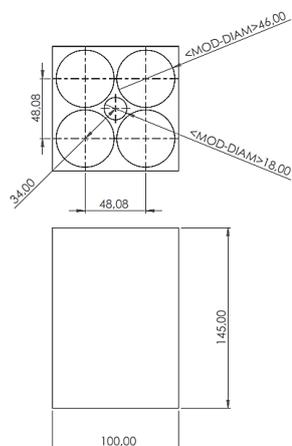


Figura 19 – Desenho técnico do bloco



## APÊNDICE 2

Código do Arduino utilizado para a captura de dados.

```
#include <Adafruit_Sensor.h>           // Biblioteca DHT Sensor Adafruit
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include "max6675.h"
#include <Adafruit_INA219.h>
#include <Wire.h>

#define sensor1Pin 0
#define sensor2Pin 1
#define sensor3Pin 2
#define sensor4Pin 3
#define DHTTYPE    DHT22              // Sensor DHT22 ou AM2302
#define DHTPIN 2      // Pino do Arduino conectado no Sensor(Data)
DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);     // configurando o Sensor DHT - pino e tipo

uint32_t delayMS;                    // variável para atraso no tempo

int ktcSO = 8; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS = 9; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK = 10; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
float TMAX;
float Celsius1, Kelvin1,Celsius2, Kelvin2,Celsius3, Kelvin3,Celsius4, Kelvin4;
float shuntvoltage = 0;
float busvoltage = 0;
float current = 0;
float power = 0;
int sensor1Value, sensor2Value, sensor3Value, sensor4Value;

Adafruit_INA219 ina219;

void setup()
{
  uint32_t currentFrequency;
  Serial.begin(9600);                // monitor serial 9600 bps
  dht.begin();                      // inicializa a função
  //Serial.println("Usando o Sensor DHT");
  sensor_t sensor;
  ina219.begin();
  dht.temperature().getSensor(&sensor); // imprime os detalhes do Sensor de Temperatura
  Serial.println("-----");
  Serial.println("Temperatura");
  Serial.print ("Sensor:   "); Serial.println(sensor.name);
  Serial.print ("Valor max: "); Serial.print(sensor.max_value); Serial.println(" *C");
  Serial.print ("Valor min: "); Serial.print(sensor.min_value); Serial.println(" *C");
  Serial.print ("Resolucao: "); Serial.print(sensor.resolution); Serial.println(" *C");
  Serial.println("-----");
  dht.humidity().getSensor(&sensor); // imprime os detalhes do Sensor de Umidade
  Serial.println("-----");
  Serial.println("Umidade");
  Serial.print ("Sensor:   "); Serial.println(sensor.name);
  Serial.print ("Valor max: "); Serial.print(sensor.max_value); Serial.println("%");
  Serial.print ("Valor min: "); Serial.print(sensor.min_value); Serial.println("%");
  Serial.print ("Resolucao: "); Serial.print(sensor.resolution); Serial.println("%");
  Serial.println("-----");
  delayMS = sensor.min_delay / 1000; // define o atraso entre as leituras
}

void loop()
{
  delay(delayMS);                    // atraso entre as medições
  sensors_event_t event;             // inicializa o evento da Temperatura
  dht.temperature().getEvent(&event); // faz a leitura da Temperatura
  if (isnan(event.temperature))     // se algum erro na leitura
  {
    Serial.println("Erro na leitura da Temperatura!");
  }
  else
    // senão
  {
    Serial.print("Temperatura do ambiente| "); // imprime a Temperatura
  }
}
```

```

    Serial.print(event.temperature);
    Serial.print(" *C | ");
}
dht.humidity().getEvent(&event); // faz a leitura de umidade
if (isnan(event.relative_humidity)) // se algum erro na leitura
{
    Serial.println("Erro na leitura da Umidade!");
}
else // senão
{
    Serial.print("Umidade do ambiente| "); // imprime a Umidade
    Serial.print(event.relative_humidity);
    Serial.print("% | ");
}

float Tmax = ktc.readCelsius() ;
Serial.print("Temperatura trocador de calor| "); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
Serial.print(ktc.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
Serial.print(" *C | "); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
GetTemp();
Serial.print(" Temp. Célula 1| ");
Serial.print(Celsius1);
Serial.print(" *C | ");
Serial.print(" Temp. Célula 2| ");
Serial.print(Celsius2);
Serial.print(" *C | ");
Serial.print(" Temp. Célula 3| ");
Serial.print(Celsius3);
Serial.print(" *C | ");
Serial.print(" Temp. Célula 4| ");
Serial.print(Celsius4);
Serial.print(" *C | ");

shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV();
busvoltage = ina219.getBusVoltage_V();
current = ((shuntvoltage*0.001*6)/(7*0.00075));
power = current*busvoltage;

Serial.print("Bus Voltage| "); Serial.print(busvoltage); Serial.print(" V| ");
Serial.print("sht Voltage| "); Serial.print(shuntvoltage); Serial.print(" mV| ");
Serial.print("Current| "); Serial.print(current); Serial.print(" A| ");
Serial.print("Power| "); Serial.print(power); Serial.println(" W");
}

void GetTemp()
{
    sensor1Value = analogRead(sensor1Pin); // read the
    Kelvin1 = (((float(sensor1Value) / 1023) * 5) * 100); // convert to
    Celsius1 = Kelvin1 - 273.15; // convert to
    delay(10);
    sensor2Value = analogRead(sensor2Pin); // read the
    Kelvin2 = (((float(sensor2Value) / 1023) * 5) * 100); // convert to
    Celsius2 = Kelvin2 - 273.15; // convert to
    delay(10);
    sensor3Value = analogRead(sensor3Pin); // read the
    Kelvin3 = (((float(sensor3Value) / 1023) * 5) * 100); // convert to
    Celsius3 = Kelvin3 - 273.15; // convert to
    delay(10);
    sensor4Value = analogRead(sensor4Pin); // read the
    Kelvin4 = (((float(sensor4Value) / 1023) * 5) * 100); // convert to
    Celsius4 = Kelvin4 - 273.15; // convert to
    delay(10);
}

```

### APÊNDICE 3

Neste apêndice são apresentadas as equações de calibração, resolução e incerteza dos sensores utilizados no estudo. Também é apresentado a localização dos sensores no setor.

Tabela 6 – Tabela com as equações de calibração dos sensores, resolução e incertezas.

Sensor	Equação de calibração	Resolução	Incerteza
<b>Termopar MAX 6675</b>	$Y=(0,001+84,27*(X^{1,43})) / (219,027+(X^{1,43}))$	0,25°C	0,13°C
<b>DHT 22</b>	$Y=0,004+0,912*X+0,012*(X)^2-0,0002*(X)^3$	0,10°C	0,05°C
<b>LM235Z – Célula 1</b>	$Y=1,97+1,17*X$	0,50°C	0,25°C
<b>LM235Z – Célula 2</b>	$Y=2,14+1,09*X$	0,50°C	0,25°C
<b>LM235Z – Célula 3</b>	$Y=4,26+1,02*X$	0,50°C	0,25°C
<b>LM235Z – Célula 4</b>	$Y=3,73+1,03*X$	0,50°C	0,25°C
<b>INA 219</b>	$Y=-30,82+3,11*X$	0,20 A	0,10 A

Figura 20 – Posicionamento dos sensores no setor

