

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ FERNANDO RIGATTI

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS DE
GERENCIAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

CURITIBA

2018

LUIZ FERNANDO RIGATTI

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS DE
GERENCIAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Curso de Pós-Graduação em Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas
Coorientador: Dr. Wellington Balmant
Coorientador: Dr. Juan Carlos Ordonez

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

R565m Rigatti, Luiz Fernando
Modelagem, simulação e validação de sistemas de gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos / Luiz Fernando Rigatti. – Curitiba, 2018.
90 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos, 2018.

Orientador: José Viriato Coelho Vargas.
Coorientadores: Wellington Balmant, Juan Carlos Ordonez.

1. Método de elementos de volume. 2. Modelagem matemática. 3. Gabinetes de telecomunicação.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Balmant, Wellington.
IV. Ordonez, Juan Carlos. V. Título.

CDD: 620.1

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



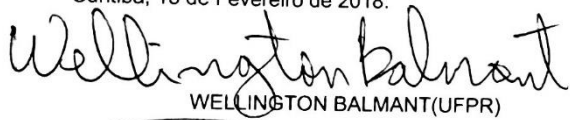
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUIZ FERNANDO RIGATTI**, intitulada: **MODELAGEM, SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS DE GERENCIAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 15 de Fevereiro de 2018.


WELLINGTON BALMANT(UFPR)

(Presidente da Banca Examinadora)


ANDRE BELLIN MARIANO(UFPR)


JOSÉ ALBERTO REIS PARISE(PUC-RIO)

Dedico este trabalho a toda minha família pelo apoio incondicional a cada momento, aos meus professores pela paciência e conhecimento a mim disponibilizados e em especial a memória de Amarildo Antônio Brustolin.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelo dom da vida e capacidade concedida.

A minha esposa Angela Brustolin Rigatti por todo o apoio, compreensão e incentivo ao longo desses dois anos. Aos meus pais Ademir Luiz Rigatti e Bernadete Angelina Beal Rigatti pela educação desde os primeiros dias de minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. PhD. José Viriato Coelho Vargas, inicialmente por acreditar em meu potencial como pessoa, e conseqüentemente por todo o suporte necessário que a mim foi concedido, também agradeço ao Dr. Wellington Balmant, pelo apoio e ensino diário durante a realização desta dissertação, ao Eng. Pedro Peixoto pelo suporte técnico com a câmara térmica e a eles ainda agradeço a amizade.

Agradeço a equipe em geral do Núcleo de Pesquisas e Desenvolvimento de Energias Renováveis – NPDEAS e a equipe do Laboratório de Máquinas Hidráulicas – LMH ambas situadas na Universidade Federal do Paraná UFPR.

Ele é como a árvore plantada na margem das águas correntes: dá fruto na época própria, sua folhagem não murchará jamais. Tudo o que empreende, prospera.

(Salmos, 1,3)

RESUMO

Os dispositivos eletrônicos geralmente são protegidos por armários, para proteção eletrostática e climática do ambiente em que estão localizados, no entanto, tais equipamentos eletrônicos podem dissipar uma grande quantidade de calor devido ao efeito Joule, que é um fator agravante para a vida útil e eficiência do equipamento. Assim, existe a necessidade de um sistema de dissipação de calor. Uma das maneiras de melhorar a eficiência térmica deste sistema é a modelagem matemática e a simulação por computador, que podem ser usadas para analisar esse problema mesmo nas fases de projeto. Portanto, o objetivo deste trabalho é a modelagem matemática e a simulação de um armário de metal que contenha equipamentos eletrônicos. O modelo matemático consiste no equilíbrio energético transitório do sistema usando a primeira lei da termodinâmica. O sistema foi discretizado usando o Método do Elemento de Volume (MEV), que gera uma malha com um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, onde a variável independente é o tempo. As simulações do modelo descreveram os resultados esperados na prática. O objetivo é agregar informações para transformar essa metodologia como ferramenta de simulação e otimização do perfil térmico de sistemas de empacotamento de eletrônicos.

Palavras-chave: Método de Elementos de Volume (MEV). Modelagem Matemática. Simulação. Otimização. Gabinetes de Telecomunicação.

ABSTRACT

Electronic devices are usually protected by cabinets, for electrostatic and weather protection of the environment in which they are located, however, such electronic equipment can dissipate a great amount of heat due to the Joule effect, which is an aggravating factor for the useful life and efficient equipment. Thus, there is a need for a heat dissipation system. One of the ways to improve the thermal efficiency of this system is mathematical modeling and computer simulation, which can be used to analyze this problem even in the design phases. Therefore, the objective of this work is the mathematical modeling and the simulation of a metal cabinet that holds electronic equipment. The mathematical model consists of the transient energy balance of the system using the first law of thermodynamics. The system was discretized using the Volume Element Method (VEM), which generates a mesh with a system of first order ordinary differential equations, where the independent variable is time. The simulations of the model described the expected results in practice. The objective is to aggregate information to transform this methodology as a tool for simulation and optimization of the thermal profile of electronic packaging systems.

Key-words: Volume Element Method (VEM). Mathematical Modeling. Simulation. Optimization. Telecom Enclosure.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1 – RELAÇÃO ENTRE PRECISÃO E TAMANHO DO MODELO MATEMÁTICO | 27 |
| FIGURA 2.2 – FLUXOGRAMA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FÍSICOS | 30 |
| FIGURA 3.1 - DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA CÂMERA | 43 |
| FIGURA 3.2 - CÂMARA TÉRMICA – LMH..... | 45 |
| FIGURA 3.3 – RELAÇÃO EQUIPAMENTOS DE SUPORTE..... | 46 |
| FIGURA 3.4 – GABINETE TELECOMUNICAÇÕES - VISTA EM PERSPECTIVA ... | 50 |
| FIGURA 3.5 – GABINETE TELECOMUNICAÇÕES - VISTA EXPLODIDA | 51 |
| FIGURA 3.6– TIPOS DE EV. E SUAS POSSÍVEIS INTERAÇÕES | 52 |
| FIGURA 3.7 - MALHA 3D..... | 53 |
| FIGURA 3.8 – DEFINIÇÃO DA MALHA POR EIXO | 53 |
| FIGURA 3.9 – CONVECÇÃO NO RESISTOR ELÉTRICO | 54 |
| FIGURA 3.10– ELEMENTO DE VOLUME TÍPICO COM TAXAS DE INTERAÇÃO COM A VIZINHANÇA E TERMO FONTE..... | 55 |
| FIGURA 3.11– EV. BALANÇO | 58 |
| FIGURA 3.12– TIPOS DE EV. E SUAS POSSÍVEIS INTERAÇÕES | 59 |
| FIGURA 4.1 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 1600 W (CORTES EM X) | 71 |
| FIGURA 4.2 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 1600 W (CORTES EM Y) | 72 |
| FIGURA 4.3 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 3000 W (CORTES EM X) | 73 |
| FIGURA 4.4 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 3000W (CORTES EM Y) | 74 |
| FIGURA 4.5 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 4225W (CORTES EM X) | 75 |
| FIGURA 4.6 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 4225W (CORTES EM Y) | 76 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| GRÁFICO 4.1 – ANÁLISE VERTICAL ESQUERDA (1600W)..... | 77 |
| GRÁFICO 4.2 – ANÁLISE VERTICAL DIREITA (1600W)..... | 77 |
| GRÁFICO 4.3 – ANÁLISE VERTICAL ESQUERDA (3000W)..... | 78 |
| GRÁFICO 4.4 – ANÁLISE VERTICAL DIREITA (3000W)..... | 78 |
| GRÁFICO 4.5 – ANÁLISE VERTICAL ESQUERDA (4225 W)..... | 79 |
| GRÁFICO 4.6 – ANÁLISE VERTICAL DIREITA (4225 W)..... | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS MODELAGENS | 26 |
| TABELA 2.2 – ESTUDOS SOBRE MODELAGEM UTILIZANDO MÉTODO (MEV).. | 33 |
| TABELA 3.1 – COORDENADAS (MM) TERMISTORES NO INTERIOR DO GABINETE | 44 |
| TABELA 3.2 – ESPECIFICAÇÃO PARA TESTES ESTÁCIONARIOS..... | 48 |
| TABELA 3.3– VALORES PARA EQUAÇÃO DE MASSA, ENERGIA E ESPÉCIES . | 58 |
| TABELA 3.4 – VALORES INICIAIS DE TEMPERATURA..... | 65 |
| TABELA 3.5 – PROPRIEDADES FÍSICAS | 65 |
| TABELA 3.6 - POTÊNCIAS UTILIZADAS | 66 |
| TABELA 3.7 – VELOCIDADE DO AR NA DIREÇÃO Y..... | 67 |
| TABELA 4.1 – RESULTADOS PACOTE DE TESTES 1 | 68 |
| TABELA 4.2 - RESUMO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS OBTIDAS DURANTE OS TESTES | 69 |
| TABELA 4.3 – QUANTIDADE EV POR EIXO | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ASME - American Society of Mechanical Engineers – Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
- COP - Coeficiente de Desempenho
- DF - Diferenças finitas
- CFD - Computational Fluid Dynamics - Dinâmica de Fluido Computacional
- EF - Método de elementos finitos
- EV - Elemento de volume
- VF - Volumes finitos
- MEV - Método de Elementos de Volume
- PEBB - Power Electronics Building Blocks – Blocos de Eletrônica de Potência
- LMH - Laboratório de Máquinas Hidráulicas
- NPDEAS - Núcleo de Pesquisas e Desenvolvimento em Energia Autossustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----|---|
| A | - área, m^2 , fator de frequência |
| Ba | - limite intrínseco da grandeza a |
| c | - calor específico, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$, centro |
| d | - diâmetro, m |
| D | - difusividade, $m^2\ s^{-1}$ |
| e | - espessura, m |
| E | - energia de ativação, J |
| FF | - fator de forma |
| G | - grandeza |
| g | - aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$ |
| H | - altura, m |
| h | - coeficiente de convecção, $J\ m^2\ K^{-1}$ |
| I | - irradiação, $W\ m^{-2}$ |
| k | - condutividade térmica, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ |
| k | - constante de ionização, |
| L | - comprimento, m |
| m | - massa, kg |
| n | - número de equações |
| p | - pressão, Pa |
| Pa | - limite de precisão da grandeza a |
| Pr | - número de Prandtl |
| Q | - calor, J |
| R | - relação estequiométrica, constante universal dos gases, $kJ\ kmol^{-1}\ K^{-1}$ |
| r | - raio, m |
| Ra | - número de Rayleigh |
| Re | - número de Reynolds |
| t | - tempo, s |
| T | - temperatura, K |
| U | - coeficiente global de transferência de calor, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ |
| u | - velocidade, $m\ s^{-1}$ |

| | |
|----|-----------------------------------|
| Ua | - incerteza da grandeza a |
| v | - velocidade, m s^{-1} |
| V | - Volume, m^3 |
| w | - concentração, g l^{-1} |
| W | - trabalho, J |
| Y | - fração mássica |
| z | - zênite, rad |

Símbolos Gregos

| | |
|---------------|---|
| α | - difusividade, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, absortividade, taxa de manutenção, s^{-1} |
| β | - coeficiente de expansão térmica e volumétrica, K^{-1} |
| ε | - emissividade, norma euclidiana, efetividade |
| δ | - espessura, m, declinação solar, rad |
| ρ | - densidade, kg m^3 |
| Φ | - campo escalar geral, latitude, rad |
| ν | - viscosidade cinemática, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ |
| σ | - desvio padrão, constante de Stefan-Boltzman, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ |
| μ | - taxa de crescimento, s^{-1} |
| ψ | - taxa de crescimento adimensional |
| φ | - umidade relativa |

Sobrescritos

| | |
|---|----------------|
| . | - taxa |
| ~ | - adimensional |
| → | - vetor |

Subscritos

| | |
|---|--------|
| a | - área |
|---|--------|

| | |
|------|---|
| av | - média |
| b | - fundo |
| conv | - convecção |
| e | - leste, equivalente, espessura |
| f | - final, fluido |
| fan | - ventilador |
| free | - livre |
| gen | - gerado |
| i | - inicial, número do elemento de volume |
| ins | - isolamento |
| j | - posição da face do elemento de volume |
| ldg | - comprimento do degasser, m |
| n | - norte, vetor normal, convecção natural |
| s | - sul, saturado |
| Sat | - saturação |
| sky | - céu |
| t | - topo, total |
| v | - vapor |
| w | - oeste, parede |
| · | - valor absoluto |
| · | - norma Euclidiana |
| [·] | - concentração molar, mol L ⁻¹ |
| 0 | - inicial |
| ∞ | - ambiente |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 17 |
| 1.2 | ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO DE DISSERTAÇÃO | 19 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 20 |
| 2.1 | GABINETES DE TELECOMUNICAÇÃO | 20 |
| 2.2 | ENGENHARIA DE SISTEMAS | 23 |
| 2.3 | MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 24 |
| 2.3.1 | Modelo de elementos de volume (MEV)..... | 28 |
| 2.3.1.1 | Abordagem do método..... | 29 |
| 2.4 | MODELO DE GERENCIAMENTO TÉRMICO | 32 |
| 2.5 | ANÁLISE DO TEMA - ESTADO DA ARTE | 33 |
| 2.5.1 | Transferência de calor e sistemas | 35 |
| 2.5.2 | Aplicação (MEV)..... | 37 |
| 2.5.3 | Modelagem matemática em gabinetes | 39 |
| 2.6 | DESAFIOS | 40 |
| 2.7 | OBJETIVOS | 41 |
| 2.7.1 | Objetivo geral | 41 |
| 2.7.2 | Objetivos específicos..... | 41 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 42 |
| 3.1 | REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL | 42 |
| 3.2 | MODELO MATEMÁTICO | 50 |
| 3.2.1 | Considerações iniciais | 50 |
| 3.2.2 | Modelo matemático | 55 |
| 3.2.3 | Modelo para gerenciamento térmico de gabinete de telecomunicações | 60 |
| 3.3 | AJUSTE DO MODELO MATEMÁTICO | 65 |
| 4 | RESULTADOS | 68 |
| 4.1 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 68 |
| 4.2 | RESULTADOS - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL..... | 70 |
| 4.3 | RESULTADOS CORRELACIONADOS | 76 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 81 |
| 5.1 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 82 |
| | REFERÊNCIAS..... | 83 |

| | |
|---|-----------|
| ANEXO A – INSTALAÇÃO DOS TERMISTORES NO GABINETE | 88 |
|---|-----------|

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão expostas as considerações iniciais, bem como a estruturação do projeto de dissertação.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Equipamentos eletrônicos de telecomunicação tais como modems e centrais telefônicas precisam ser instalados em regiões próximas do usuário final. Dessa forma, esses equipamentos devem ser colocados em gabinetes metálicos para proteção contra intempéries do ambiente e vandalismo. Contudo, esses equipamentos dissipam uma grande quantidade de calor por efeito Joule, o que demanda um sistema eficiente de remoção de calor desses gabinetes metálicos, pois esses equipamentos não podem operar em temperaturas acima de 60 °C.

Devido a uma alta demanda por serviços de telefonia, a densidade de equipamentos por gabinete metálico aumentou consideravelmente. Esse aumento na quantidade de equipamentos fez com que a geração de calor por efeito Joule aumentasse significativamente dentro do gabinete. Isso faz com que os gabinetes demandem sistemas cada vez mais eficientes para remoção de calor, tais como trocadores de calor, ventiladores de exaustão e em alguns casos extremos até sistemas de ar condicionado. A adição desses sistemas aumenta consideravelmente os custos de produção desses gabinetes metálicos para telecomunicação.

Uma forma de redução dos custos de fabricação desses gabinetes é projetar um sistema de remoção de calor com a maior eficiência possível, reduzindo o custo de produção do sistema de remoção de calor. Uma das formas de encontrar um sistema de remoção de calor com a maior eficiência possível é através da modelagem matemática, simulação e otimização do sistema de dissipação de calor.

Comumente estes problemas são abordados de maneira complexa com metodologias que resultam em equações dependentes do espaço e tempo; com isso há necessidade de computadores de grande capacidade de hardware para solucioná-las. Porém mesmo tendo esta disponibilidade, isto gera um grande tempo de processamento, o que potencializa a inviabilização de estudos na área. Surge então a necessidade de ferramentas de simulação mais simplificadas, porém com respostas que agreguem precisão e baixo tempo computacional.

O método de elemento de volume (MEV) apresentado nesta dissertação propõe ser capaz de realizar simulações através de modelos matemáticos com equações diferenciais ordinárias que não dependem do espaço, sendo apenas dependentes do tempo ou de equações algébricas. Com isso não se utiliza de equações diferenciais parciais, diferenciando-o dos métodos tradicionais.

O (MEV) combina princípios da termodinâmica, transferência de calor e massa e mecânica dos fluidos. Também faz a combinação destas três áreas de conhecimento a fim de relacionar da melhor forma possível os fenômenos físicos no sistema a ser analisado.

Como o próprio nome sugere o (MEV) traz como filosofia dividir o sistema em elementos de volume, onde cada volume é analisado separadamente, sendo considerada a comunicação entre os volumes vizinhos através da transferência de energia e/ou massa. É por este motivo que o (MEV) não precisa de dependência espacial (cada EV tem sua localização definida).

Sendo assim é importante a construção de um modelo matemático que descreva o comportamento térmico de gabinetes utilizados para armazenar equipamentos eletrônicos de telefonia. O modelo matemático deve ser desenvolvido utilizando o método de elementos de volume.

Por fim, por se tratar de um estudo térmico o Grupo de Energia e Ciências Térmicas – GECT situada na Universidade Federal do Paraná – UFPR viabilizou a realização de todas as etapas desta dissertação. O GECT foi fundado em 1996 e atua nas áreas de energia, mecânica dos fluidos, termodinâmica e fenômenos do transporte, os pesquisadores do grupo também direcionam esforços na elaboração de ferramentas de simulação nas áreas acima citadas.

As pesquisas do GECT são realizadas em três laboratórios, sendo o Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energias Autossustentável – NPDEAS, o qual desenvolve pesquisas científicas para viabilização da utilização de microalgas como matéria prima para fabricação de biocombustíveis. Laboratório de Células de Combustível – LaCeIC que pesquisa o desenvolvimento de novas células de combustíveis alcalinas e eletrólito polimérico. E ainda conta com o Laboratório de Máquinas Hidráulicas – LMH, este que trabalha com pesquisas térmicas, e com foco no desenvolvimento de gabinetes para acondicionamento de eletrônicos, área de refrigeração e ar condicionado, Engenharia Biomédica e sistemas energéticos em geral.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO DE DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo é responsável pelas considerações e motivação deste trabalho, que tem como objetivo aplicar o método de elementos de volume em gabinetes de telefonia a fim de possibilitar uma ferramenta eficaz para o gerenciamento térmico destes sistemas através da simulação computacional.

No segundo capítulo consta a revisão bibliográfica, a qual dá o embasamento teórico necessário para que o leitor possa compreender o tema proposto e entender o contexto a ser aplicado o (MEV). Há também neste capítulo uma análise do estado da arte, buscando uma abordagem de estudos na área de modelagem e simulação computacional tanto para sistemas portadores de equipamentos eletrônicos como abordagens de transferência de calor e ainda assuntos envolvendo a aplicação do método (MEV) em diversos tipos de sistemas. Contudo ao final deste capítulo são apresentados os desafios para criação da ferramenta de simulação.

O terceiro aborda os materiais e métodos utilizados na realização desta dissertação, seguindo como diretriz a realização de cada objetivo específico proposto no capítulo 2. Para melhor organização o capítulo fora dividido entre a modelagem matemática, onde tem-se um modelo matemático utilizando o Método de Elementos de Volume (MEV) de forma generalizada, e posteriormente o modelo é aplicado ao gerenciamento térmico para gabinetes de telecomunicações. Em seguida as principais características e a parte experimental são descritas, possibilitando assim, uma melhor forma de conduzir e desenvolver os resultados no capítulo seguinte.

Na quarta parte deste trabalho encontram-se os resultados encontrados. São apresentados resultados experimentais realizados em um gabinete de telecomunicações, onde é possível visualizar a resposta térmica real do gabinete. Desta forma é possível a validação do modelo matemático.

O capítulo 5 traz as conclusões ao final de todo o trabalho e sugestões para trabalhos futuros. E por fim no sexto capítulo estão agrupadas todas as referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é abordada toda a base teórica necessária para desenvolvimento do trabalho, assim como alguns desafios e vantagens da abordagem adotada.

2.1 GABINETES DE TELECOMUNICAÇÃO

Gabinetes de telecomunicação são armários metálicos utilizados para comportar equipamentos eletrônicos, responsáveis pela recepção e transmissão de sinais telefônicos. Sendo assim, também são responsáveis pela proteção dos componentes instalados no seu interior contra toda ameaça externa, como de mudanças climáticas, chuva, vento, animais entre outros. Conseqüentemente o controle de umidade e temperatura também deve ser mantido sobre responsabilidade destes armários.

Meng et al. (2015) define que armários exteriores são usados para abrigar muitas formas de equipamentos eletrônicos, podendo abrigar desde baterias até equipamentos de telecomunicações.

São dois os objetivos de se utilizar armários metálicos, sendo inicialmente fornecer espaço físico de armazenamento e em segundo, proteger os equipamentos eletrônicos de condições ambientais adversas. Como normalmente os equipamentos eletrônicos geram quantidades consideráveis de calor quando estão ligados, os gabinetes necessitam de um sistema de gerenciamento térmico apropriado para garantir a temperatura aceitável de operação (MENG et al., 2015).

O conceito de gerenciamento de redes de telecomunicações vem sofrendo alterações. Antes coexistiam pequenos grupos de gabinetes com alto número de usuários por gabinete. Hoje a tendência é diminuir o número de usuários por gabinete aumentando o número de gabinetes (CAMPOS, 2004).

Esta tendência favorece a manutenção e correção de falhas, diminuindo o número de usuários afetados, também possibilitando maior customização nas linhas e um maior controle nos parâmetros onde isto se faz necessário.

Gabinetes com menor número de usuários tem como característica armazenar apenas equipamentos eletrônicos, distribuídos estrategicamente na área

onde há necessidade da rede. Há grande variabilidade dos equipamentos eletrônicos em seu interior quanto a dimensões, consistência e composição (CAMPOS, 2004).

Atualmente são poucos os estudos de dissipação térmica em gabinetes de telecomunicação, por outro lado há demanda tanto mercadológica quanto científica em torno do assunto.

Todo sistema requer energia para desempenhar trabalho. No entanto, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, sempre existem perdas.

Nos gabinetes eletrônicos um dos maiores contribuintes para ineficiência neste sistema é o aumento excessivo na temperatura. Para isso uma das ações plausíveis é a melhora na capacidade de transferência de calor interna do gabinete com o ambiente externo, uma vez que, os equipamentos eletrônicos aquecem no interior do gabinete em consequência do efeito Joule.

Como resultante do aumento excessivo da temperatura nos componentes eletrônicos, tem-se a menor eficiência e até mesmo a falha do componente por excesso de temperatura em condições extremas de pico ou ciclo. Um exemplo para falha de pico de temperatura é a própria deterioração dos materiais, por exemplo o derretimento dos componentes mais sensíveis, na prática, um exemplo muito comum está associado ao isolamento de um condutor, este pode vir falhar acarretando em rompimento do próprio condutor ou até mesmo o curto circuito entre condutores. Na falha cíclica devido ao alto delta de temperatura, tem-se a dilatação dos componentes excessivamente e em contrapartida ao ser desligado o sistema a temperatura diminui e assim estes mesmos componentes tendem a contrair, esta dilatação e posterior contração associada a um número muito grande de ciclos acarreta na falha por fadiga mecânica dos materiais que formam cada componente eletrônico.

Conhecido estes desafios, há ainda uma tendência natural em reduzir o tamanho total dos gabinetes eletrônicos, o que dificulta ainda mais a transferência de calor.

A necessidade em conceber equipamentos para empacotamento de eletrônicos menores motiva estudos nesta área, onde o aumento da transferência de calor é o objetivo a ser atingindo e nestes casos com maiores desafios devido às dimensões menores dos novos equipamentos. Ou seja, visa agrupar (empacotar) o maior número de circuitos, cabos, baterias, componentes eletrônicos em geral em um espaço limitado, com um fluido refrigerante compreendendo todo o restante do espaço de maneira a manter sob controle a temperatura, e que esta não ultrapasse o valor

máximo delimitado pelo projeto (CAMPOS, 2004). Além de garantir a melhor transferência de calor com maior número de componentes no interior dos armários cada vez menores, é interessante entender os pontos com maior ou menor temperatura dentro do sistema, desta forma possibilitando a realocação dos equipamentos a fim de homogeneizar a temperatura.

Com isso é imprescindível melhorar a eficiência destes sistemas. Uma forma é abordar o sistema com modelos matemáticos capazes de simular e testar todos os parâmetros possíveis em favor de encontrar a melhor configuração. O domínio da termodinâmica, transferência de calor e massa e mecânica dos fluidos, é a maneira concreta de abordar todos os fenômenos físicos reais de maior relevância.

O objetivo é prever as condições de operação dos equipamentos para encontrar o campo de temperaturas e de umidade relativa no seu interior, sendo desta forma possível manter parâmetros adequados (VARGAS; ARAKI, 2016).

Por isto estudos focados em técnicas para transferência de calor nestes equipamentos eletrônicos se caracterizam com um aspecto fundamental e de grande relevância nos últimos anos (PETERSON; ORTEGA, 1990; BAR-COHEN; KRAUS, 1990). O conhecimento dos gradientes de temperatura possibilita o controle mais aprofundado do que realmente acontece no interior destes gabinetes, facilitando assim a redução de tamanho; pois é possível simular antecipadamente a interação entre os componentes e assim relacionar a menores distâncias possíveis entre eles e que ainda haja quantidade de fluido refrigerante suficiente para transferir o calor gerado e manter a temperatura dentro dos valores estabelecidos em projeto.

A busca pela melhor transferência de calor em equipamentos com dimensões reduzidas requer otimização, e isto se dá pela realocação dos componentes eletrônicos dentro do equipamento, ou seja, verificando as melhores distâncias entre os componentes visando a melhor taxa de transferência de calor. Dentre a variação da distribuição geométrica dos componentes eletrônicos no interior destes equipamentos, a mais simples e fundamental análise retrata a distância ótima entre dois componentes adjacentes (CAMPOS, 2004).

Bar-Cohen e Rosehnow (1984) reportam uma distância ideal para placas planas na vertical, para casos de resfriamento por convecção natural. Posteriormente o mesmo foi investigado por Bejan (1995), Kim et al. (1991) e Anand et al. (1992).

No entanto todas as considerações citadas devem ser abordadas visando o sistema como um todo, a fim de encontrar respostas mais rápidas e com informações

globais referentes à transferência de calor. Para isto, é necessário recorrer à abordagem de engenharia de sistemas.

2.2 ENGENHARIA DE SISTEMAS

Tradicionalmente os problemas de engenharia são tratados de maneira especializada, onde cada equipamento que compõe um sistema é projetado de maneira independente do resto do sistema. Por exemplo, em um navio a turbina de propulsão é projetada independentemente do sistema de condicionamento de ar, porém quando esses equipamentos são acondicionados e operam juntos dentro de um navio há uma interação entre esses componentes, pois ambos estão operando próximos um do outro e afetando-se termicamente. Para avaliar de forma mais rápida a interação entre os componentes de um sistema complexo pode-se utilizar a abordagem de engenharia de sistemas.

O estudo da engenharia de sistemas teve início nos laboratórios da Bell na década de 1940, partindo da necessidade de estudar as propriedades de um sistema como um todo, ou seja, não é abordado individualmente cada componente como normalmente as análises são realizadas (HALL, 1962).

Generalizadamente, sistemas podem ser descritos como um conjunto que integra pessoas, produtos e processos dos quais cada tópico junto ou separadamente tem o objetivo de atender uma necessidade específica (DEPARTMENT OF DEFENSE SYSTEMS MANAGEMENT COLLEGE, 2001).

Por Hall (1962) e Sage (1992), tratando mais especificamente, engenharia de sistemas é um campo interdisciplinar da engenharia que foca no desenvolvimento e organização de sistemas artificiais complexos.

Para evidenciar e reforçando este conceito, a engenharia de sistemas torna possível a concretização de 'Sistemas' de elevada complexidade INCOSE (International Council of Systems Engineering). A INCOSE nasceu primeiramente apenas como NCOSE, nos Estados Unidos da América, com o nome de *National Council on Systems Engineering* no ano de 1990, basicamente se tratava de um grupo associado de profissionais que representavam algumas empresas. A principal função deste grupo era abordar melhorias nos métodos oferecidos pela visão de tratar sistemas através da engenharia de sistemas, devido à crescente demanda por esta técnica. A NCOSE então abordava o ensino e também a divulgação de engenharia de

sistemas. Apenas no ano de 1995 seu nome foi alterado para *International Council on Systems Engineering* (INCOSE), a mudança ocorreu devido à participação de grande quantidade de engenheiros de sistemas de outros países (HONOUR, 1998).

Já no Brasil a INCOSE chegou em 2012 e atualmente são em torno de 60 engenheiros membros (DILAY, 2013).

Busca-se na fase de desenvolvimento preliminar de um sistema, relacionar as necessidades do usuário e funcionalidades especificadas que se deve atingir, assim concebendo a síntese de projeto e a etapa de validação para abordar o problema como um todo simultaneamente relatando dados dos requisitos de forma sistemática (HONOUR, 1998).

Por isso vale evidenciar que engenharia de sistemas utiliza um conjunto de ferramentas que incluem modelagem e simulação (SAGE, 1992), assim auxiliando a abordagem de forma interdisciplinar do conjunto, utilizando ferramentas e métodos atuais possibilitando antecipar resultados para melhor conhecimento do projeto já na fase do planejamento.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Antecipadamente ao uso de ferramentas de simulação computacional é necessária a modelagem matemática.

Compreende-se que modelagem matemática busca abordar a complexidade do sistema através de um equacionamento matemático adequado que permita representar de maneira satisfatória o comportamento de sistema físico durante seu ciclo, estado estacionário, transiente ou ambos. Conseqüentemente a modelagem matemática, parte-se para a simulação em computadores, assim, diminuindo despesas nas fases de projeto, pois desta forma é possível obter respostas de vários tipos de configurações do projeto, optando então pelo que mais se aproximará das necessidades estabelecidas (DILAY, 2013).

O conceito de simulação computacional já vem sendo usado desde a década de 60, inicialmente abordando problemas relacionados a meteorologia. Com o ganho de conhecimento nestas áreas, já nas décadas de 70 e 80 surgiu um aumento significativo de fornecedores de sistemas computadorizados, mas foi só em torno de 1990 que as ferramentas de simulação computacional ganharam força e relevância

significativa. O fato disso acontecer foi pelo grande crescimento do número dos computadores pessoais fabricados pela IBM (DILAY, 2013).

Atualmente os computadores evoluíram de forma significativa, no entanto o sucesso da simulação computacional ainda depende da modelagem matemática, em outras palavras, mesmo com excelentes computadores, a complexidade de muitos sistemas ultrapassa e muito a capacidade de processamento computacional, quando são detalhados na modelagem matemática de forma minuciosa os fenômenos físicos envolvidos.

Sistemas complexos contém grande quantidade de componentes; e um modelo matemático capaz de representar fielmente os fenômenos ali envolvidos acaba por se tornar também complexo, desta forma, inviabilizando a simulação computacional quando o objetivo é encontrar respostas rápidas.

Quando é grande o tempo necessário para avaliação de apenas uma configuração do sistema em análise, é possível concluir que pode ser inviável o processo de otimização via modelagem e simulação. Como já mencionado, mesmo com computadores de alto desempenho, formas de análises compostas a fim de analisar os fenômenos físicos dentro de engenharia de sistemas, trazem uma forma qualitativa que requer equações de menor complexidade (VARGAS; ARAKI, 2016).

Tendo em vista esse problema é necessário sempre que o sistema for demasiadamente complexo uma simplificação das equações do modelo matemático utilizado em engenharia de sistemas, porém essa simplificação deve ser capaz de resultar em simulações quantitativas adequadas ao sistema. Tendo estabelecido isto, pode-se então classificar tipos de modelos matemáticos.

Os modelos podem ser classificados a respeito de seu grau, preliminarmente pode-se enquadrar duas categorias de forma a abordar o grau de complexidade, chamadas de modelos qualitativos e modelos quantitativos. O modelo qualitativo, prevê tendências de respostas, porém com baixa precisão dos locais de variáveis e valores absolutos. Já o modelo quantitativo prevê tendências de respostas e alta precisão de valores locais das variáveis (WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS et al., 2001). Ou modelo de baixa ou alta ordem (*low order*, *high order*) segundo Shapiro (2003), que também pode ser apresentado como modelo concentrado ou distribuído (TRIVELATO, 2003; KAISER, 2004).

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS MODELAGENS

| Precisão de tendência baixa, precisão de valores absolutos ou locais das variáveis | Precisão de tendência, alta precisão de valores absolutos ou locais das variáveis | Referência |
|---|--|---|
| Qualitativa | Quantitativa | WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS <i>et al.</i> , 2001 |
| Concentrada | Distribuída | TRIVELATO, 2003; KAISER, 2004 |
| Sistema | Componente | HALL, 1962; SAGE, 1992 |
| Baixa ordem | Alta ordem | SHAPIRO, 2003 |

FONTE: Dilay (2013)

Modelo de alta ordem utiliza-se de equações diferenciais parciais (SHAPIRO, 2003), com isso tem-se maior precisão nos resultados, porém de forma a necessitar maior tempo computacional. Modelos de baixa ordem utilizam-se de equações diferenciais parciais ou ordinárias, esta última de menor ordem (VARGAS; ARAKI, 2016).

No entanto, conforme mostrado na Tabela 2.1, é possível alterar a ordem do modelo, assim sendo, para um modelo de baixa ordem, basta ajustá-lo a fim de transformá-lo em um modelo de ordem reduzida, para um modelo de alta ordem, basta simplificá-lo ou em outras palavras, reduzi-lo, que então surgirá um modelo reduzido. Modelo de ordem reduzida se enquadra no intervalo de modelos de baixa e de alta ordem. Modelos de ordem reduzida tem como característica boa precisão com tamanho razoável, ou seja, um modelo ajustado para oferecer os melhores resultados possíveis dentro de um menor conjunto de equações matemáticas, quando comparado a modelos de alta ordem, assim visando melhores resultados dentro de menores tempos de processamento (VARGAS; ARAKI, 2016).

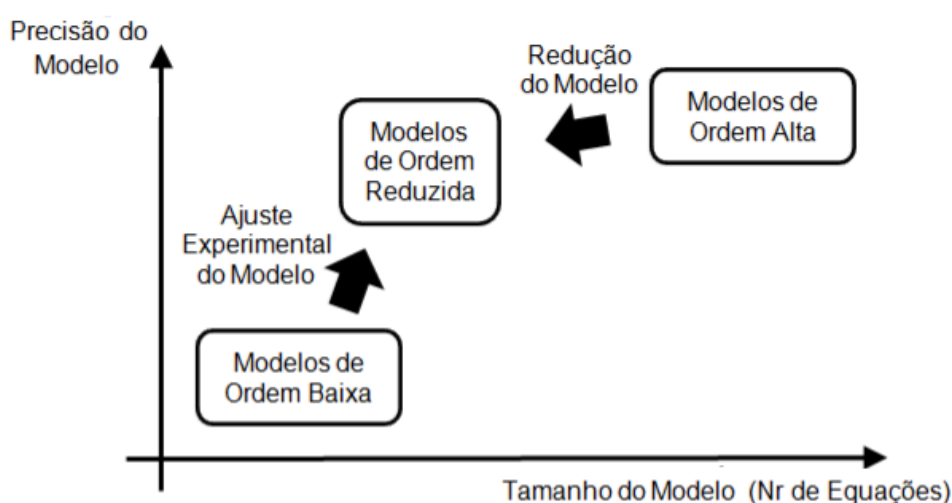
Também uma maneira satisfatória de obter um modelo de ordem reduzida é através da estimativa de parâmetros, quando o sistema físico já existe é possível coletar os dados experimentais e compará-los com os obtidos em simulação e a partir deste ponto adequar o modelo matemático através das respostas reais, facilitando assim a consideração no modelo apenas dos fenômenos que mais influenciam naquele sistema.

Então modelo de ordem reduzida combina boa precisão de resposta com equações matemáticas mais simples que modelos de alta ordem. Este tipo de modelo

vem sendo usado frequentemente e com resultados satisfatórios em simulações de engenharia de sistemas. Um modelo de ordem reduzida, reduz em apenas 5% a precisão da simulação, novamente se comparado com modelos de alta ordem.

Basicamente modelos de alta ordem consideram maior quantidade de fenômenos físicos, e como já relatado, normalmente utilizam-se de equações diferenciais parciais de ordem mais alta. Por isso o nome de ordem alta. Evidentemente que estes modelos apresentam as melhores precisões em respostas. Já os modelos de baixa ordem são compostos por equações diferenciais parciais ou ordinárias de menor ordem, naturalmente também daí surge a descrição de modelos de baixa ordem. A geração e refino da malha é diretamente afetada por este conceito devido a discretização do sistema no espaço. Onde pode haver dependência do espaço e tempo ou apenas do tempo (DILAY, 2013).

FIGURA 2.1 – RELAÇÃO ENTRE PRECISÃO E TAMANHO DO MODELO MATEMÁTICO



FONTE: Vargas; Araki (2016)

A seguir foram analisados dois artigos que se utilizaram de modelagem matemática e simulação computacional, os dois são similares e retratam a análise em sistemas equipados com trocadores de calor, no entanto um abordou o modelo a baixa ordem e o outro o modelo resultante foi de alta ordem. Neste ponto o objetivo é apenas mostrar o tempo utilizado durante a simulação computacional.

Com o modelo de ordem baixa, Pasquier e Marcotte (2012) trabalharam com um trocador de calor enterrado no solo que foi baseado em um modelo de resistência e capacidade térmica. Neste caso o *software* utilizado fora o MATLAB e 3000 foi o

número de interações feitas através do método Runge-Kutta. No entanto devido a simplicidade não fora considerado para este modelo o escoamento de fluido dentro dos tubos e nem a variação do coeficiente de convecção interna. Porém o tempo necessário para simulação em um computador de mesa foi de apenas um segundo.

Mais complexo por utilizar um modelo de ordem alta foi o trabalho de Tsuzuki, Kato e Ishiduka (2007) que estudaram trocadores de calor de alta performance em circuitos impressos. Neste caso o número de interações também fora de 3000. O *software* utilizado foi o FLUENT, e a malha foi gerada pelo *software* GAMBIT. O modelo de turbulência κ - ϵ e como algoritmo o SIMPLE sincronizando pressão e velocidade. Entretanto o tempo necessário foi de um dia e meio, ou aproximadamente 129.600 segundos.

A diferença entre o tempo utilizado na simulação é demasiadamente maior no modelo mais complexo. Então o desafio neste quesito é encontrar um modelo que seja suficientemente capaz de apresentar repostas satisfatórias e ao mesmo tempo simples ao ponto de não requerer tanto esforço computacional. Como já mostrado anteriormente, sabe-se que é possível através de modelos de ordem reduzida atingir este objetivo, ou seja, tempos de processamento muito menores e repostas com precisão aceitável com uma margem de apenas 5% de erro se comparado com modelos de ordem alta.

2.3.1 Modelo de elementos de volume (MEV)

Dentre os modelos de ordem reduzida podem ser destacados os modelos matemáticos que utilizam o MEV. Seguindo esta metodologia no campo térmico com o intuito de obter repostas verdadeiras com os modelos Vargas et al. (2001), Ordonez et al. (2008), Dias et al. (2009), Vargas et al. (2012) e Dilay et al. (2013) investigaram previamente modelos físicos simplificados em circuitos eletrônicos empacotados, sendo neste caso o domínio de interesse discretizado nas três dimensões espaciais. Fazendo uso de um esquema de volumes finitos com células centradas como base, e então análises regidas pelos princípios da termodinâmica clássica e transferência de calor foram devidamente aplicadas.

Sendo assim, com estas análises físicas fica possível conceber um modelo com equações diferenciais ordinárias em relação ao tempo. De modo a quantificar as interações energéticas entre as células em relação ao tempo e ao espaço,

considerando temperaturas e umidades relativas a fim de delimitar a malha, correlações empíricas e analíticas já existentes são usadas para obter grandezas físicas necessárias para o modelo convergir.

Esta forma de abordar o problema foi caracterizada como um modelo dinâmico tridimensional de ordem reduzida e recebeu o nome de modelo de elementos de volume (MEV) proposto por Vargas et al. (2001).

Há outra forma de abordar o mesmo problema com um modelo de ordem reduzida, trata-se de modelos zonais, no entanto estes modelos requerem alta experiência do analista responsável pelo desenvolvimento do modelo, uma vez que neste caso é exigido que a conexão entre as células e interfaces sejam feitas de modo manual, e também deve ser compreendido antes de iniciar as definições do modelo como o escoamento irá se comportar no domínio desejado (SONG; MURRAY; SAMMAKIA, 2013).

Sage (1992) já relatava que conforme as ferramentas de projeto normalmente empregadas não atendem de forma coerente a necessidade, surgem métodos capazes de abordar apenas os fatores mais relevantes do projeto e que terá o maior impacto no resultado final.

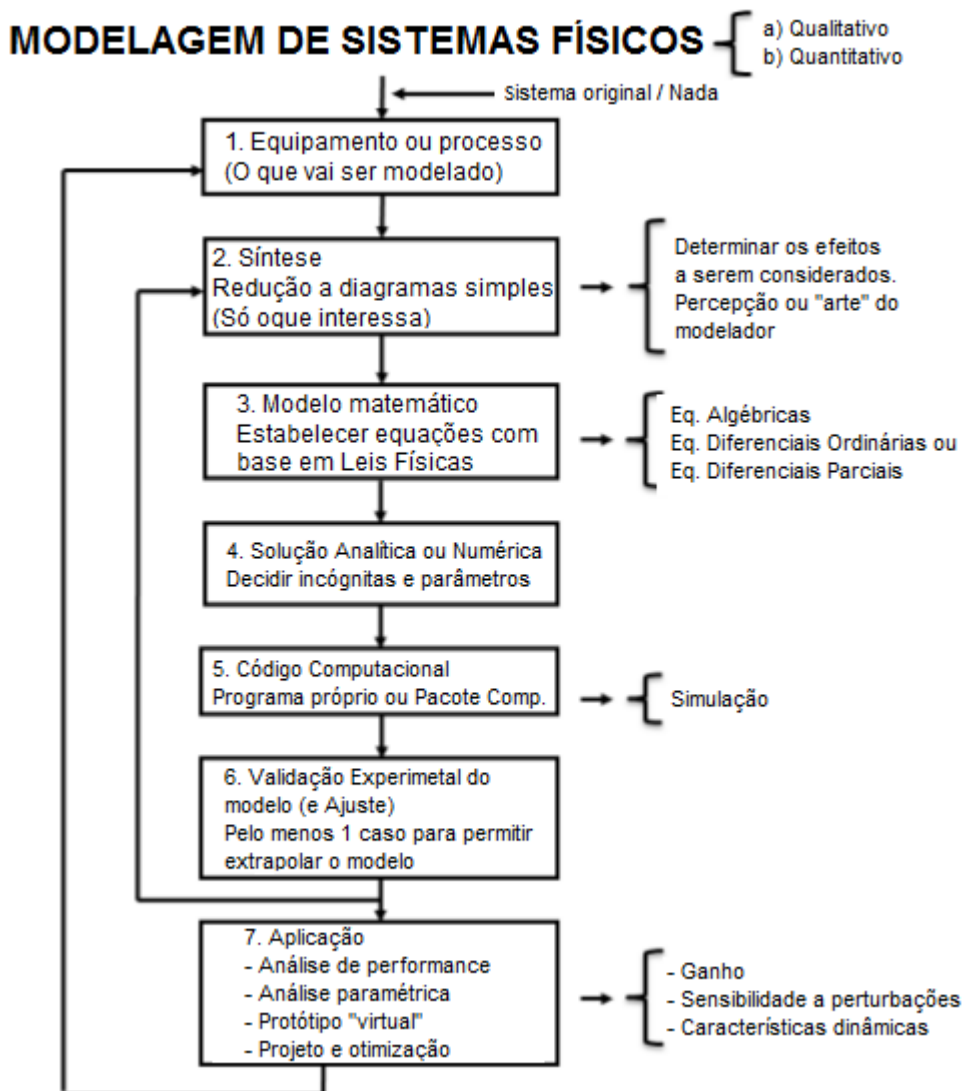
O (MEV) busca combinar interdisciplinarmente metodologias já dominadas para formar um modelo de ordem reduzida, intermediário, porém mantendo uma confiabilidade e precisão satisfatória para auxiliar no desenvolvimento inicial do projeto, contribuindo para análises preliminares sem grandes capacidades computacionais ou alto tempo de processamento (VARGAS; ARAKI, 2016).

2.3.1.1 Abordagem do método

Após as considerações iniciais, deve-se abordar uma metodologia correta para iniciar a modelagem em si.

A FIGURA 2.2, retrata uma maneira lógica e temporal que vem sendo adotada por vários pesquisadores na área de engenharia de sistemas (WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS et al., 2001).

FIGURA 2.2 – FLUXOGRAMA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FÍSICOS



FONTE: Woods; Lawrence, (1997); Vargas et al., (2001)

O fluxograma da FIGURA 2.2, busca melhorar a metodologia proposta para modelagem e simulação de sistemas (WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS et al., 2001). Basicamente orienta o modelador a raciocinar em tópicos fundamentais referentes ao modelo, assim fazendo-o considerar cada ponto da análise.

O modelador ao se deparar com o modelo deve iniciar verificando qual a classificação ou ordem do modelo desejado e se o estudo proposto já foi analisado ou é algo hipotético. Posteriormente uma síntese é elaborada a fim de verificar as hipóteses a serem empregados ao modelo, buscando a melhor maneira de obter hipóteses pertinentes e que levem em consideração todos os fenômenos físicos envolvidos no projeto.

Essas hipóteses visam simplificar o modelo matemático sempre que possível, nesta etapa o conhecimento do modelador é fundamental, e faz-se necessário o entendimento e conhecimento correto do sistema, pois só assim é possível elaborar um modelo simplificado e capaz de obter respostas satisfatórias ao mesmo tempo. No terceiro momento, tendo como bagagem o desenvolvimento dos passos citados anteriormente, cria-se o modelo matemático em si, resultando em equações diferenciais ordinárias ou parciais e equações algébricas. Então já com as equações em mãos decidem-se os parâmetros e incógnitas do modelo matemático a fim de verificar se é possível uma solução analítica, pois caso o modelo não for resolvido analiticamente deve-se então buscar uma solução numérica capaz de realizar a convergência (VARGAS; ARAKI, 2016).

Compreendido que o modelo matemático irá ser solucionado numericamente, é necessária a escolha do código computacional pelo modelador.

Com as EDO's transiente formuladas para cada EV específico, é então executada a integração das equações simultaneamente. Neste ponto, utilizando condições iniciais conhecidas para as variáveis de integração, o sistema de equações transientes é integrado explicitamente no tempo usando o método de passo adaptativo Runge-Kutta de quarta-quinta ordem para resolução (KINCAID; CHENEY, 1991).

O passo no tempo, é ajustado automaticamente, conforme estabelecido o erro de truncamento local, este que deve ficar abaixo da tolerância especificada delimitada para o caso (CAMPOS, 2004).

Posteriormente conforme o fluxograma apresentado, e já com o modelo solucionado, inicia-se a fase de ajuste e validação. Nesta etapa procura-se verificar a precisão dos resultados e posteriormente o uso prático (VARGAS; ARAKI, 2016). Sem à aplicação prática, o modelo matemático não teria utilidade alguma na abordagem desta dissertação.

O modelo deve então ser aplicado ao processo ou equipamento, afim de obter dados para análise paramétrica, dinâmica e de desempenho, sempre verificando se o objetivo inicial está sendo atendido e se os dados obtidos realmente atendem a necessidade imposta. Se o resultado for satisfatório, compreende-se que o modelo está adequado, porém se insatisfatório, o modelador deve voltar às primícias desta análise e recomeçar (VARGAS; ARAKI, 2016).

2.4 MODELO DE GERENCIAMENTO TÉRMICO

O sistema onde será elaborado o gerenciamento térmico é o gabinete de telecomunicação, mais especificamente um armário metálico que acondiciona equipamentos eletrônicos. As dimensões e os aspectos físicos do gabinete são conhecidas, assim como a taxa de calor gerada pelos equipamentos.

O problema se resume em calcular o campo de temperatura e umidade relativa dentro deste armário (DILAY, 2013). Com intuito de maximizar a transferência de calor para reduzir a temperatura interna do armário, usando o método de elementos de volume (RIGATTI et al., 2017).

Para sistemas onde envolve-se o gerenciamento térmico a abordagem mostrada no tópico 2.3 é válida igualmente para encontrar um modelo suficientemente capaz de fornecer o perfil de temperatura, mostrando novamente a grande variabilidade de aplicação deste tipo de método. No entanto não é diferente também a compreensão correta das particularidades envolvendo os fenômenos físicos, só assim é possível o modelador atingir seus objetivos em qualquer área que deseje aplicar esta metodologia.

O mau gerenciamento térmico pode evidentemente levar a um evento inesperado e, em último caso, à falha mecânica ou elétrica dos sistemas (SOMAN; DAVIDSON; MCARTHUR, 2009).

Para encontrar a máxima eficiência global de um sistema de acondicionamento de eletrônicos através de simulações computacionais são necessários modelos térmicos confiáveis, que permitam a otimização coerente. Uma vez que estes tipos de equipamentos (ex. gabinete eletrônico) dissipam quantidades significativas de calor, desta forma, o desempenho do sistema é dependente também destes grandes transientes térmicos. Por isso busca-se estratégias de gerenciamento térmico satisfatório a fim de evitar falhas decorrentes da temperatura excessiva. O correto conhecimento do campo de temperatura do equipamento é fundamental para o controle das tensões termomecânicas, uma vez, que estas são extremamente deletérias ao equipamento como um todo (DILAY, 2013).

No decorrer do tempo outras formas de abordagem surgiram, visando simplificar a busca por resultados, pois até então as respostas eram obtidas a custo de grande trabalho, sendo este custo, computacional e de tempo. Um exemplo é a operação do método dos elementos finitos (MEF). Conforme Bagnoli et al. (2011) e

Yang e Chen (2011) ficou evidenciada a necessidade de modelos intermediários, principalmente tratando do comportamento dinâmico e não mais estacionário de acondicionamento de eletrônicos.

Visto isto, é possível afirmar a relevância da aplicação do (MEV) em sistemas complexos, ao exemplo de modelos de gerenciamento térmico, em regime estacionário e principalmente transiente é viável. Desta forma é necessário criar uma ferramenta utilizando o (MEV), capaz de fornecer repostas rápidas e com precisão aceitável. Ao aplicar esta ferramenta em sistemas reais, terá possibilidade de auxiliar nas tomadas de decisões, com intuito de obter resultados preliminares, tanto nas fases de projeto quanto em fases de operação.

2.5 ANÁLISE DO TEMA - ESTADO DA ARTE

A seguir a Tabela 2.2 relaciona alguns artigos de fundamental relevância da aplicação do (MEV) em alguns sistemas, estes estudos norteiam a aplicação do (MEV) para gerenciamento de temperatura. Também artigos abordando a modelagem e simulação em equipamentos eletrônicos com outras metodologias e artigos correlacionados estão relatados nesta tabela.

TABELA 2.2 – ESTUDOS SOBRE MODELAGEM UTILIZANDO MÉTODO (MEV)

(continua)

| Ref: | Ano: | Autor: | Área de Aplicação: | Modelo Adimensionalizado: | Modelo Validado Experimentalmente: | Efetuada Otimização: | Resultado: |
|------|------|------------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | 1971 | Tierney J.K. e Koczkur E. | Transferência de calor | Não | Não | Não | Viável para o proposto |
| 2 | 2002 | Goldstein R.J. et al. | Transferência de calor | Não | Não | Não | Viável para o proposto |

(continua)

| Ref: | Ano: | Autor: | Área de Aplicação: | Modelo Adimensionalizado: | Modelo Validado Experimentalmente: | Efetuada Otimização: | Resultado: |
|------|------|---------------------------|--|---------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 3 | 2005 | Alaoui C. e Salameh Z. M. | Gestão térmica para baterias de veículos | Não | Sim | Não | Viável para o proposto |
| 4 | 2008 | Ordonez J. C. et al. | Gerenciamento térmico navio. | Não | Não | Não | Viável para o proposto |
| 5 | 2013 | Dilay E. et al. | Armazenamento de Eletrônicos | Não | Sim | Não | Viável para o proposto |
| 6 | 2014 | Dilay E. et al. | Engenharia de Sistemas | Não | Sim parcial | Não | Viável para o proposto |
| 7 | 2014 | Vargas J.V.C. et al. | Processo Hidrogênio microalgas | Não | Sim | Não | Viável para o proposto |
| 8 | 2014 | Andrese n M. e Liserre M. | Impacto do design de equipamentos eletrônicos no gerenciamento térmico | Não | Não | Não | Viável para o proposto |
| 9 | 2015 | Yang S. et al. | Gerenciamento térmico de navios | Não | Não | Não | Viável para o proposto |
| 10 | 2015 | Meng X. Z. et al. | Gerenciamento térmico de gabinete de baterias | Não | Sim | Não | Viável para o proposto |
| 11 | 2015 | Rossetti A. et al. | Modelagem fluxo de ar em gabinete de refrigeração | Não | Sim | Não | Viável para o proposto |

| Ref: | Ano: | Autor: | Área de Aplicação: | Modelo Adimensionalizado: | Modelo Validado Experimentalmente: | Efetuada Otimização: | Resultado: |
|------|------|------------------------------------|--|---------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 12 | 2015 | Wang L. et al. | Gerenciamento do fluxo de ar e térmico de gabinete de refrigeração | Não | Não | Sim | Viável para o proposto |
| 13 | 2017 | Rashidkhanov A. T. e Yusufov S. A. | Desenvolvimento do sistema térmico para gabinetes de telecomunicação | Não | Sim | Não | Viável para o proposto |

FONTE: O autor (2016).

2.5.1 Transferência de calor e sistemas

Para buscar um registro mais antigo, em 1971, James K. Tierney e Eugene Koczkur abordaram o assunto sobre um gabinete totalmente fechado com equipamentos eletrônicos dissipando calor em seu interior. Basicamente o estudo se baseava na transferência de calor do gabinete. O procedimento compreendeu em coletar dados experimentais de um gabinete que em seu interior continha fontes elétricas geradoras de calor para simular o aquecimento de equipamentos eletrônicos. Compreendeu-se que abaixo das fontes a temperatura era menor, e que melhorando a emissividade das paredes do gabinete a temperatura tenderia a diminuir. Também se observou que em determinados níveis de potência a temperatura do ar interno e da parede do gabinete tenderiam a se manter constantes. Assim sugerem que a parte superior horizontal é a região de melhor troca de calor do sistema. Sugerem ainda a tentativa de diminuir a temperatura da parede do gabinete, pois esta afeta a temperatura do ar interno. Dessa forma fica claro que estas recomendações foram assertivas, no gabinete utilizado nesta dissertação os ventiladores estão instalados na parte superior horizontal, também as paredes são duplas com 16 mm de espessura total no gabinete para auxiliar no controle da temperatura interna.

Goldstein et al. (2002), efetuaram uma revisão sobre transferência de calor onde foram abordados os métodos de transferência de calor e suas particularidades, no mesmo trabalho escreveram sobre alguns tipos de sistemas de troca de calor; abordando a termodinâmica relatam que a combinação termodinâmica ótima entre dois fluxos em diferentes temperaturas é determinada pela maximização da geração de energia associada unicamente à transição de fluxo para transmissão. Também destacam alguns problemas relevantes como o trabalho máximo produzido em um sistema termodinâmico no tempo finito, o trabalho mínimo a ser feito para transformar um sistema de equilíbrio em vários subsistemas e a potência máxima obtida em um tempo finito. Assim falam que cogeração de várias formas de energia em um único equipamento dependerá dos parâmetros termodinâmicos do sistema. Porém muito relevante ao trabalho desta dissertação eles mencionam que uma análise dinâmica de fluido fornece uma visão útil dos processos de transferência de calor em sistemas eletrônicos.

Alaoui e Salameh, em 2005, estudaram uma maneira de garantir a temperatura correta nos compartimentos de bateria de um veículo elétrico ou híbrido, eles relatam o quão importante para a operação segura e um ótimo desempenho das baterias é a correta temperatura, também é associado o conforto térmico na cabine do veículo, ou seja, no compartimento dos passageiros. Este artigo tratou sobre o projeto, fabricação e teste de um novo sistema de gerenciamento térmico para veículos elétricos/híbridos. Para tal utilizaram bombas de calor de efeito Peltier. Eles relatam que no caso das baterias não é apenas o calor excessivo, mas a baixa temperatura também afeta o funcionamento das baterias do veículo. Separaram o artigo em três partes. Na primeira discutem a influência da temperatura na eficiência das baterias, já na segunda parte apresentam algumas maneiras de tratar a gestão térmica deste tipo de sistema, também relatam as vantagens e desvantagens de cada. Por fim descrevem e avaliam o sistema utilizado, no caso, bombas de efeito Peltier. Com o sistema proposto eles obtiveram 52 °C de temperatura máxima e 9,5 °C para mínima, também relatam o COP e concluem que este tipo sistema foi satisfatório para a necessidade proposta, tem vida útil longa, encontra-se em estado sólido, não se utiliza de reações químicas, por isso, segundo os autores é mais confiável, são leves e com baixo custo de manutenção. Ainda indicam que o sistema é mais eficiente quando usado para refrigeração e menos para aquecimento. Quanto ao modelo foi possível atingir o resultado esperado.

No artigo de Andresen e Liserre (2014) é relacionado o design de sistemas térmicos com o gerenciamento térmico, ressaltam que o formato destes sistemas está totalmente relacionado com o gerenciamento térmico e que sempre é imposto um grau de segurança em relação ao tamanho do equipamento para melhor gerenciamento térmico. Os autores propõem que o uso do correto gerenciamento térmico reduz as perdas, sem violar as restrições térmicas. É sugerido o uso de um sistema de gerenciamento térmico não apenas para reduzir as falhas relacionadas com a temperatura limite, mas também para obter uma redução de perdas em condições transitórias. Os autores observaram analiticamente o ciclo térmico de um inversor e destacam como condições de operação diferentes alteram significativamente a temperatura. São demonstrados também exemplos práticos de como o sistema de gerenciamento térmico pode controlar as perdas e reduzir o estresse térmico. Por fim concluem como o sistema de gerenciamento térmico permite a redistribuição dos equipamentos e a redução de perdas, assim possibilitado a otimização de equipamentos eletrônicos sem afetar a eficiência do sistema. Este estudo tem abrangência direta em alguns pontos relacionados a esta dissertação, onde em alguns momentos os autores buscam a melhor configuração do sistema através da observação dos gradientes térmicos. Para este tipo de abordagem uma ferramenta de simulação térmica eficaz e rápida serviria de total auxílio para encontrar os resultados que os autores buscaram.

2.5.2 Aplicação (MEV)

O artigo de Ordonez et al, do ano de 2008, apresenta um modelo matemático geral elaborado através do (MEV), combinando princípios de termodinâmica clássica e transferência de calor aplicado em navios totalmente elétricos e compartimentos que contêm equipamentos eletrônicos no interior gerando calor. As equações diferenciais tridimensionais resultantes são discretizadas no espaço usando um volume centrado em células. A simulação foi elaborada em estado estacionário para os dois casos apresentados no artigo. Para atingir a convergência a malha elaborada foi relativamente grossa, sendo em torno de 175 a 320 EV em ambas as análises. Com isso obteve baixo tempo de processamento e precisão satisfatória, caracterizando assim o modelo como eficiente para o estudo proposto.

Em 2013 Dilay et al. publicaram também utilizando a mesma abordagem do (MEV), mas neste caso apenas para armazenamento de eletrônicos, e novamente o modelo simplificado proposto pelo método se mostrou eficaz, dentro de sua proposta.

Já o artigo de Dilay et al. (2014) que aborda o (MEV) em diferentes sistemas (engenharia de sistemas), inclusive em armazenamento de eletrônicos, é a referência de grande relevância e compatibilidade geral com a ideia apresentada nesta dissertação, o mesmo aborda as equações gerais aqui utilizadas, as particularidades do (MEV) e inclusive a geração de malha. Assim como nos outros estudos, todos os modelos apresentam o pensamento lógico de elaboração da modelagem através do método proposto.

Em resumo foram obtidas respostas já com maior refinamento de malha, ao exemplo do gabinete de empacotamento de eletrônicos, este atingiu convergência em estado estacionário com 2000 EV.

Vargas et al. no ano de 2014 tornaram pública a aplicação do (MEV) em processos de obtenção de Hidrogênio através de microalgas, mais uma vez obtendo sucesso com a aplicação da metodologia do método de elementos de volume na modelagem matemática, em estado transiente, tendo como dependência à temperatura no meio de cultivo das microalgas. Uma malha de 6048 elementos foi capaz de atingir a convergência neste caso.

Por fim Yang et al. (2015) também elaboraram um artigo com o uso do (MEV) aplicado para o gerenciamento térmico de navios, no entanto dando atenção a estratégias para geração de malhas, capazes de atingir melhor rendimento computacional com precisão.

Ao final da pesquisa é afirmado a versatilidade possível de aplicação do método (MEV) em vários tipos de sistemas, até mesmo sendo utilizado em sistemas vivos. Constatou-se a precisão das respostas através das validações experimentais, comprovando também as vantagens relacionadas ao tempo e menor capacidade computacionais exigida, conforme exposto no referencial teórico.

Outra não foram encontrados estudos da aplicação do (MEV) em gabinetes de telecomunicação, assim, justificando a importância do estudo proposto nesta dissertação. Com esta dissertação foi possível ter uma ferramenta validada experimentalmente capaz de simular os perfis de temperatura no interior de gabinetes de telecomunicações.

2.5.3 Modelagem matemática em gabinetes

Meng et al. (2015) escreveram sobre o gerenciamento térmico de um gabinete acondicionador de baterias. Basicamente fora elaborado uma forma de gerenciamento térmico e simulado em CFD, os resultados experimentais também foram coletados com intuito de validação. Os resultados encontrados na simulação ficaram dentro de uma margem de erro de 5% se comparado com os valores experimentais. O objetivo é muito similar com o desta dissertação, encontrar uma ferramenta de simulação computacional, a fim de posteriormente poder auxiliar na melhor configuração do sistema, no caso deles, a melhor configuração de alocação das baterias dentro do armário que permita agrupar o máximo de baterias sem exceder a temperatura limite. A diferença deste artigo é a utilização práticas comuns de abordar este problema ao exemplo do CFD, sem ter como objetivo aperfeiçoar a própria ferramenta de gerenciamento térmico, ou utilizar-se de metodologias que atendem mais as necessidades de projeto.

Também em 2015 Rossetti, Minetto e Marinetti desenvolveram uma modelagem capaz de representar o fluxo de ar dentro de gabinetes de refrigeração, um dos maiores objetivos relatado pelos autores é a complexidade do modelo matemático e altos custos computacionais ao lidar com estes tipos de problemas. Contudo fora utilizado CFD para simulação e o modelo também foi validado experimentalmente. Outro fator que apresentou grande dificuldade fora modelar matematicamente a transição do fluxo turbulento para laminar dentro do volume do evaporador conforme o sistema físico. No entanto foi possível evidenciar que a má distribuição do ar afeta a eficiência desses gabinetes de refrigeração. Mesmo sendo uma modelagem pontual, a grande complexidade em operar modelos complexos é sim o fator limitante como relatado pelos autores, o que de fato concretiza a necessidade de modelos intermediários.

Ainda em 2015 Wang, Zhang e Lian trabalharam com o gerenciamento do fluxo de ar e também térmico de gabinete de refrigeração. Neste artigo foi realizada a simulação em 3D do fluxo de ar e variação de temperatura no armário de refrigeração durante o ciclo entre ligar e desligar. Foi utilizado o software FLUENT para obter o modelo e posteriormente simular em CFD. O tempo necessário da simulação foi calculado para os ciclos. Posterior aos dados obtidos foi possível efetuar a otimização do sistema, os autores também relatam que com a correta simulação são obtidos os

dados da distribuição detalhada da temperatura no gabinete e também parâmetros operacionais do sistema. No entanto foi relatado neste artigo a necessidade também de supercomputadores para o sucesso do trabalho.

Mais recente, em 2017, na Rússia, Rashidkhanov e Yusufov desenvolveram um estudo relacionado diretamente no regime térmico de gabinetes de telecomunicações com intuito de obter respostas confiáveis do gradiente de temperatura gerando também dados de operação. Desenvolveram um gabinete para poder realizar os ensaios experimentais, o protótipo do sistema de refrigeração constitui uma bateria termoelétrica feita de materiais termoelétricos unificados padrão do tipo ICE-71. No modelo foi realizado algo similar ao exposto nesta dissertação, eles elaboraram a modelagem método de redução das equações diferenciais ordinárias (Kan-Torovich), segundo os autores este método fornece uma precisão aceitável para esta classe de problemas. Voltando ao sistema, uma proposta de refrigeração foi mencionada, trata-se de tubos de calor através da refrigeração termoelétrica, conclui-se que o sistema de refrigeração proposto possui vantagens em relação ao resfriamento forçado ou natural convencional.

2.6 DESAFIOS

O uso de uma metodologia para modelagem matemática, simulação e validação, utilizando um modelo mais simplificado, que ofereça boa precisão aliado a baixa complexidade, como o (MEV), vem cada vez mais se mostrando forte aliado na análise de sistemas complexos. No entanto algumas características devem ser observadas para cada particularidade do sistema em análise, sendo assim alguns desafios foram identificados para melhorar o estado da arte:

- i) Modelos de ordem reduzida exigem muito da experiência do modelador, falhas nesta etapa comprometerá todo trabalho;
- ii) Modelos de ordem baixa normalmente não conseguem levar em consideração todos os fenômenos físicos envolvidos;
- iii) Modelagem matemática utilizando modelos de ordem alta, muitas vezes inviabilizam a simulação computacional, devido à grande necessidade de processamento.
- iv) Pela grande complexidade em simular computacionalmente apenas um componente do sistema utilizando modelos de ordem alta, compreende-

se que para análise em engenharia de sistemas modelos assim não atendem a necessidade;

- v) Definir os campos de velocidade se torna fator determinante dentro de um gabinete, devido à alta complexidade somados as características físicas do gabinete.

2.7 OBJETIVOS

Os objetivos específicos que devem ser executados para atingir o objetivo geral deste trabalho estão descritos abaixo:

2.7.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é a modelagem matemática e simulação de sistemas de gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos.

2.7.2 Objetivos específicos

A fim de lograr o objetivo geral e facilitar o raciocínio temporal, algumas etapas devem ser delimitadas e cumpridas.

- i) Realizar medições experimentais de temperatura em um gabinete de condicionamento de eletrônico com dimensões totais de 1974x850x2048 mm;
- ii) Elaborar um modelo de ordem reduzida objetivando a simplificação das equações em engenharia de sistemas;
- iii) Obter modelo matemático com base na 1ª lei da Termodinâmica, a fim de obter resposta térmica e psicrométrica do gabinete de telecomunicação;
- iv) Ajustar experimentalmente o modelo matemático;
- v) Obter dados satisfatórios das respostas térmicas do sistema com a ferramenta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo do trabalho é possível observar dois segmentos. Inicialmente abrange-se à demanda experimental, a qual fora essencial para possibilitar o ajuste do modelo matemático na qual estão agregados três dos objetivos específicos.

Em seguida, com a modelagem matemática, estão agregados os outros dois objetivos específicos descritos no capítulo anterior.

3.1 REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o intuito de realizar medições experimentais de temperatura no gabinete de telecomunicações, foram realizados testes térmicos no Laboratório de Máquinas Hidráulicas – LMH. Os referidos testes englobam as condições necessárias para obtenção dos dados. A realização ocorreu na câmara térmica do LMH, com dimensões de 3600 mm de comprimento por 1650 mm de largura e 2650 mm de altura, que pode operar com um range entre 5 °C a 100 °C, conforme norma a temperatura de 45 °C foi utilizado na câmara térmica.

Esta câmara é capaz de representar condições climáticas artificiais normais e críticas, simulando assim as condições de uso do gabinete. No teste o intuito é a alta temperatura, como dias quentes em países tropicais, sendo este o fator mais deletério para os equipamentos eletrônicos. Para manter um padrão no controle da temperatura interna esta câmara é isolada termicamente e possui antecâmara, ou seja, é possível controlar o ambiente no local desejado (câmara principal) e ao redor (antecâmara) possibilitando ainda menor variação de temperatura. Sendo a mesma também equipada com dois aparelhos de ar-condicionado, um para cada ambiente (câmara e antecâmara).

Na parte superior interna da câmara é instalado lâmpadas incandescentes, estas são responsáveis por simular a incidência de radiação e também auxiliar no aumento da temperatura.

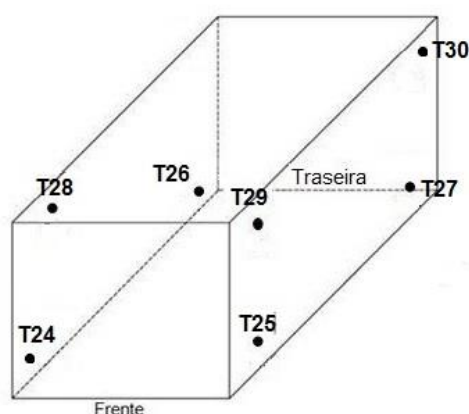
A câmara térmica ainda conta com resistências elétricas responsáveis pelo aumento da temperatura no exterior do gabinete e no interior do próprio gabinete de telecomunicações, nas coordenadas (987,0 mm; 425,0 mm; 615,0 mm), são instaladas resistências elétricas capazes de simular a geração de calor interna que os equipamentos eletrônicos geram ao serem energizados. A capacidade máxima de

potência disponível pelas resistências associadas é de 8.800 W, controlada por um Varivolt.

A instrumentação é composta por sensores térmicos – termistores NTC de alta precisão que são calibrados com uma incerteza de $\pm 0,4$ °C, os quais funcionam sensivelmente através da variação de temperatura, alterando a resistência elétrica oferecida em seus terminais, termistores NTC diminuem a resistência elétrica conforme o aumento da temperatura, assim são capazes de verificar as respostas térmicas no interior da câmara e do gabinete de telecomunicações.

Foram utilizados em toda área da câmara sete termistores, dos quais é possível calcular a média aritmética para obter a temperatura da câmara térmica, a localização dos termistores da câmara térmica esta ilustrada a seguir na FIGURA 3.1.

FIGURA 3.1 - DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA CÂMERA



Fonte: UFPR (2016)

Para encontrar os valores de interesse no teste algumas equações são utilizadas, então a diferença de temperatura (ΔT) é calculada a partir da equação (3.1),

$$\Delta T = T_m - T_c \quad (3.1)$$

Onde T_m representa a temperatura média do ar interno do gabinete e T_c representa a temperatura média controlada da câmara térmica. Já a condutividade térmica UA é obtida utilizando a dissipação interna de calor e o ΔT médio do gabinete na seguinte equação (3.2) de transferência de calor.

$$UA = \dot{Q}/\Delta T \quad (3.2)$$

Se tratando do gabinete, que é o objeto do ensaio, o mesmo foi instrumentado com 17 sensores térmicos – termistores, possibilitando a coleta de dados em pontos específicos e de interesse. A localização dos termistores no interior do gabinete está descrita em milímetros na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – COORDENADAS (MM) TERMISTORES NO INTERIOR DO GABINETE

| Termistor | Coordenadas cartesianas |
|-----------|-------------------------|
| T0 | 372,0; 425,0; 267,0 |
| T1 | 1602,0; 425,0; 267,0 |
| T2 | 372,0; 425,0; 802,5 |
| T3 | 1602,0; 425,0; 805,5 |
| T4 | 372,0; 425,0; 1337,5 |
| T5 | 1602,0; 425,0; 1337,5 |
| T6 | 987,0; 425,0; 293,0 |
| T7 | 629,5; 425,0; 1800,0 |
| T8 | 1344,5; 425,0; 1800,0 |
| T9 | 136,0; 425,0; 512,0 |
| T10 | 136,0; 425,0; 1536,0 |
| T11 | 1838,0; 425,0; 512,0 |
| T12 | 1838,0; 425,0; 1536,0 |
| T13 | 493,5; 100,0; 1017,5 |
| T14 | 493,5; 0,0; 1017,5 |
| T15 | 1534,5; 100,0; 1017,5 |
| T16 | 1534,5; 0,0; 1017,5 |

FONTE: O autor (2017)

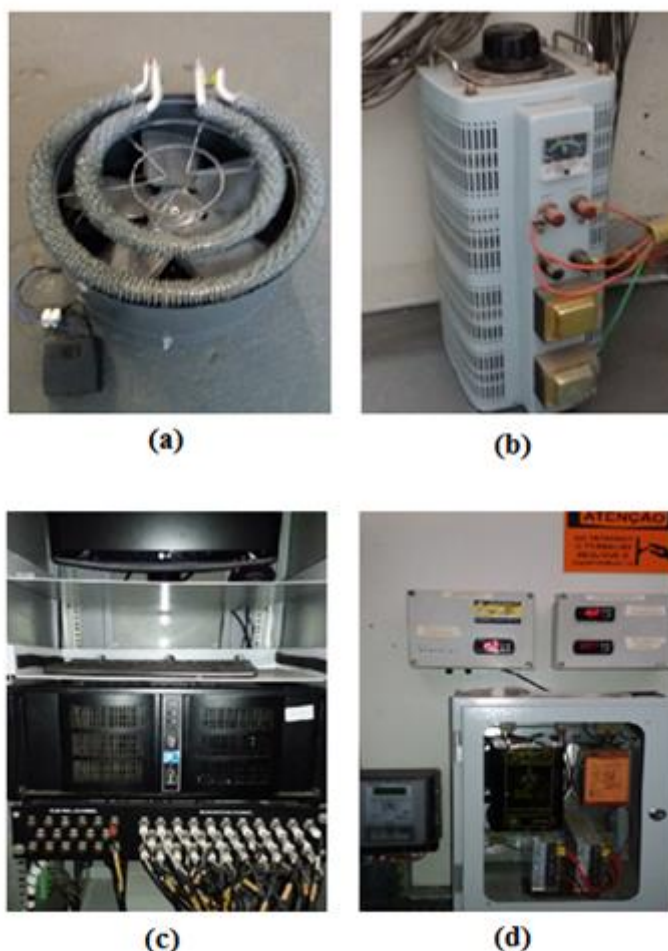
Todos os dados coletados nos experimentos são enviados a um computador, nele estes dados são processados com auxílio do Labview, software de programação gráfica que auxilia na interface homem-máquina. Para possibilitar interação entre o comando computacional e os dados coletados na câmara térmica/gabinete, há um painel de controle que converte tensão alternada em contínua.

FIGURA 3.2 - CÂMARA TÉRMICA – LMH



Componentes: (a) Ar-condicionado interno – (b) Lâmpada incandescente - (c) Termistor câmara – (d)
Resistência elétrica
FONTE: O autor (2016)

FIGURA 3.3 – RELAÇÃO EQUIPAMENTOS DE SUPORTE



Componentes: (a) Resistência elétrica – (b) Varivolt – (c) Computador Labview – (d) Painel de controle

FONTE: O autor (2016)

Para realização dos testes térmicos além dos itens descritos acima deve-se relacionar as normas que envolvem testes em gabinetes de telecomunicações, ao exemplo das normas internacionais, tais como a norma ETS 300753 para normatizar o grau de ruído emitido pelos equipamentos de telecomunicações. A norma IEC 61587-3 normatiza a questão da blindagem eletromagnética de racks e gabinetes que comportam equipamentos eletrônicos. Também a IEC 60068-2-11 tratando de Salt-Spray nestes sistemas.

No entanto para a realização dos testes térmicos em si, fora utilizado a norma internacional ETSI EN 300 019-2-4 que normatiza testes ambientais em equipamentos de telecomunicações. A norma especifica métodos para os testes de severidades com objetivo de verificar a resistibilidade necessária do equipamento em função do

ambiente que está alocado. Os testes aplicam-se ao uso estacionário de equipamentos em locais não protegidos das condições climáticas que abrangem as condições ambientais estabelecidas na EN 300 019-1-4. Logo esta norma prevê algumas respostas ideais para o gabinete em diversas condições de operação em regime estacionário. Para altas temperaturas o ar no interior do gabinete deve permanecer entre 40 e 55 °C por um tempo de 16 horas, porém no Brasil o tempo de pico de temperatura em condição de uso é inferior as 16 horas, em gabinetes que só recebem influência climática, apenas natural. A Tabela 3.2 mostra as especificações de teste estacionários em locais não protegidos.

TABELA 3.2 – ESPECIFICAÇÃO PARA TESTES ESTACIONARIOS

(continua)

| Parâmetro ambiental | | | Classe ambiental 4.1 | Especificação do teste ambiental T4.1: uso estacionário Locais não-meteorologicamente protegidos | | | | | |
|---------------------|------------|---------------------|---------------------------|---|----------------------------------|-----------------------|----------------------------|--|---|
| Tipo | Parâmetro | Detalhes parâmetros | Característica severidade | Teste de severidade | Duração | Referencia | Método | Notas (ver cláusula 5) | |
| Temperatura do ar | baixo | (°C) | -33 | -33 ou -45 | 16 h | IEC 60068-2-1 [2] | Ab/Ad: frio | 1 | |
| | alto | (°C) | +40 | +40 ou +55 | 16 h | IEC 60068-2-2 [2] | Bb/Bd: calor seco | 2 | |
| | mudança | (°C)(°C/min) | 0,5 | -10/+40 0,5 | 2 ciclos t ₁ = 3 h | IEC 60068-2-14 [2] | Nb: Mudança de temperatura | 3 | |
| Umidade | relativo | baixo | (%) | 15 | nenhum | | | 8 | |
| | | alto | (%) (°C) | 100 | 93+30 | 10 d | IEC 60068-2-56 [2] | Cb: estado estacionário de calor úmido | 4 |
| | absoluto | condensação | (%) (°C) | Sim | 90-100+30 | 2 ciclos | IEC 60068-2-30 [2] | Db: calor úmido, variante cíclica 1 | 5 |
| | | baixo | (g/m ³) | 0,26 | nenhum | | | | |
| | alto | (g/m ³) | 25 | | | | | 6 | |
| Ar | pressão | baixo | (kPa)(kPa) | 70106 | nenhum | | | 7 | |
| | | alto | | | nenhum | | | 7 | |
| | velocidade | (m/s) | 50 | nenhum | | | | 8 | |

(conclusão)

| Tipo | Parâmetro | Detalhes parâmetros | Característica severidade | Teste de severidade | Duração | Referencia | Método | Notas (ver cláusula 5) |
|-------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Água | chuva | intensidade | 6 mm/min | 0,01 m ³ /min | 3 min/m ² | IEC 60068-2-18 Rb: [2] | impacto método da água 2.2 | 9 |
| | outras fontes | baixa temperatura (°C) | +5 | nenhum | | | | 10 |
| | congelamento e geada | | Sim | nenhum | | | | 8 |
| Radiação | sol | (W/m ²) | 1 120 | | | | | 11 |
| | calor | (W/m ²) | insignificante | | | | | |

FONTE: ETSI (2003)

Outro ponto a ser considerado nesta norma é que ela fornece duas temperaturas para o ensaio do ar aquecido, a temperatura mais baixa não se considera a radiação solar, na alta temperatura é considerado.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

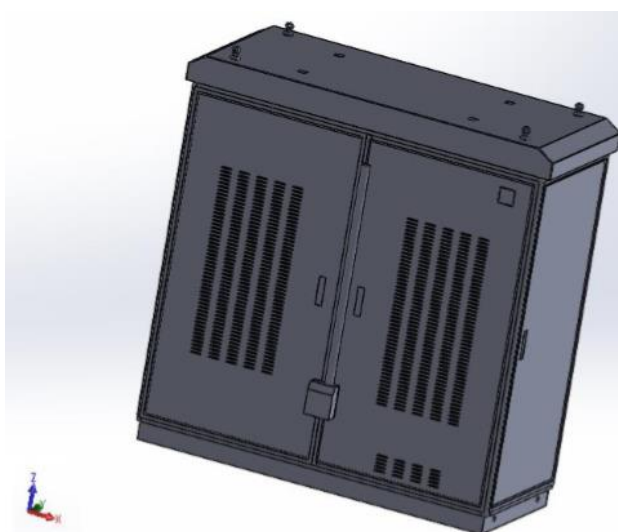
Este tópico apresenta o modelo matemático elaborado através do (MEV), apresentado de forma generalizada, e em seguida o modelo é aplicado para o gerenciamento térmico de gabinetes de telecomunicações.

3.2.1 Considerações iniciais

Antes de iniciar o modelo matemático é de fundamental importância conhecer minuciosamente o funcionamento do sistema em análise, compreender os fenômenos físicos ali envolvidos e relacionar apenas os fatores que realmente afetam o resultado.

As dimensões do gabinete de telecomunicações foram medidas e em seguida modeladas com auxílio do software SolidWorks, o arquivo gerado foi convertido para .vtk assim possibilitando o domínio computacional. A seguir a FIGURA 3.4 apresenta a modelagem 3D em perspectiva do gabinete utilizado para definição do modelo matemático e limite do domínio computacional.

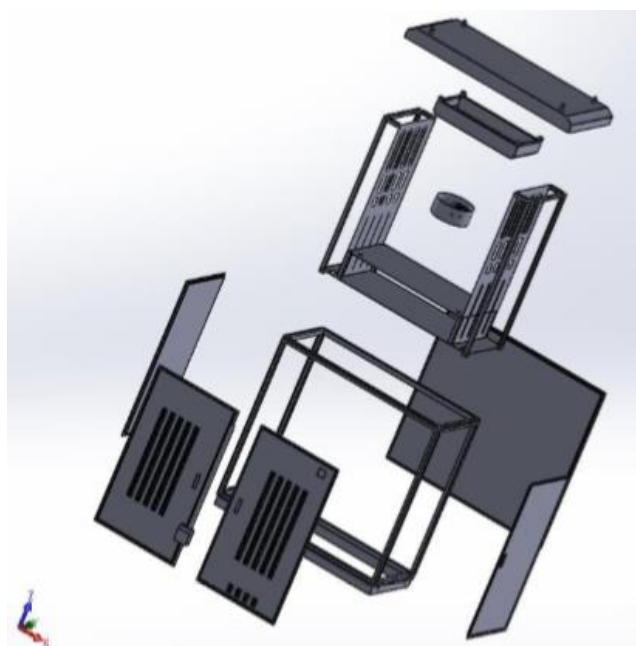
FIGURA 3.4 – GABINETE TELECOMUNICAÇÕES - VISTA EM PERSPECTIVA



FONTE: O autor (2017)

A FIGURA 3.5 apresenta a vista explodida do mesmo gabinete, fica possível a visualização completa do sistema. Vale ressaltar que nesta modelagem o gabinete encontra-se vazio, ou seja, sem os equipamentos eletrônicos instalados.

FIGURA 3.5 – GABINETE TELECOMUNICAÇÕES - VISTA EXPLODIDA

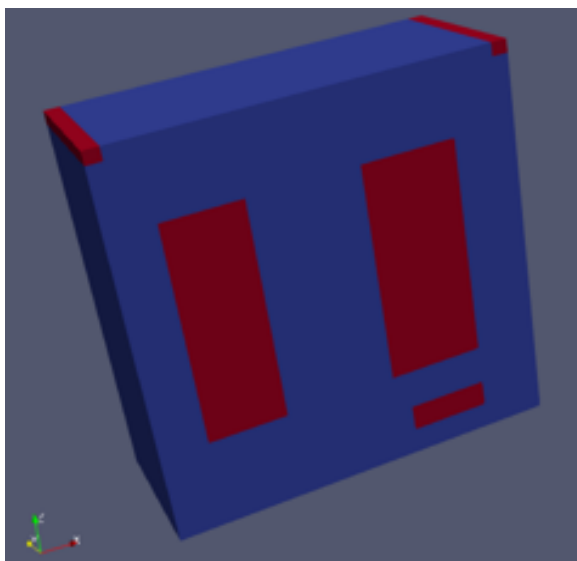


FONTE: O autor (2017)

No gabinete em questão o sistema de resfriamento basicamente consiste em manter um fluxo de ar proveniente do exterior do armário, onde o mesmo ao entrar devido a sucção de dois ventiladores, entra em contato com as faces dos componentes eletrônicos aquecidos, ocorrendo assim a troca de calor por parte da peça aquecida para com o ar, este que se encontra até então em temperatura inferior. Em seguida o ar é expelido para fora. Cada ventilador possui vazão de 860 m³/h, e potência de 56 W 48 V com dimensões de 190 mm de diâmetro e 69 mm de altura, o ventilador esquerdo está localizado nas coordenadas (629,5 mm; 425,0 mm; 1800,0 mm) e o ventilador direito (1344,5 mm; 425,0 mm, 1800,0 mm) a partir do ponto (0,0 mm; 0,0 mm; 0,0 mm) que está localizado na frente do gabinete na parte inferior à esquerda. A FIGURA 3.6 ilustra o ponto.

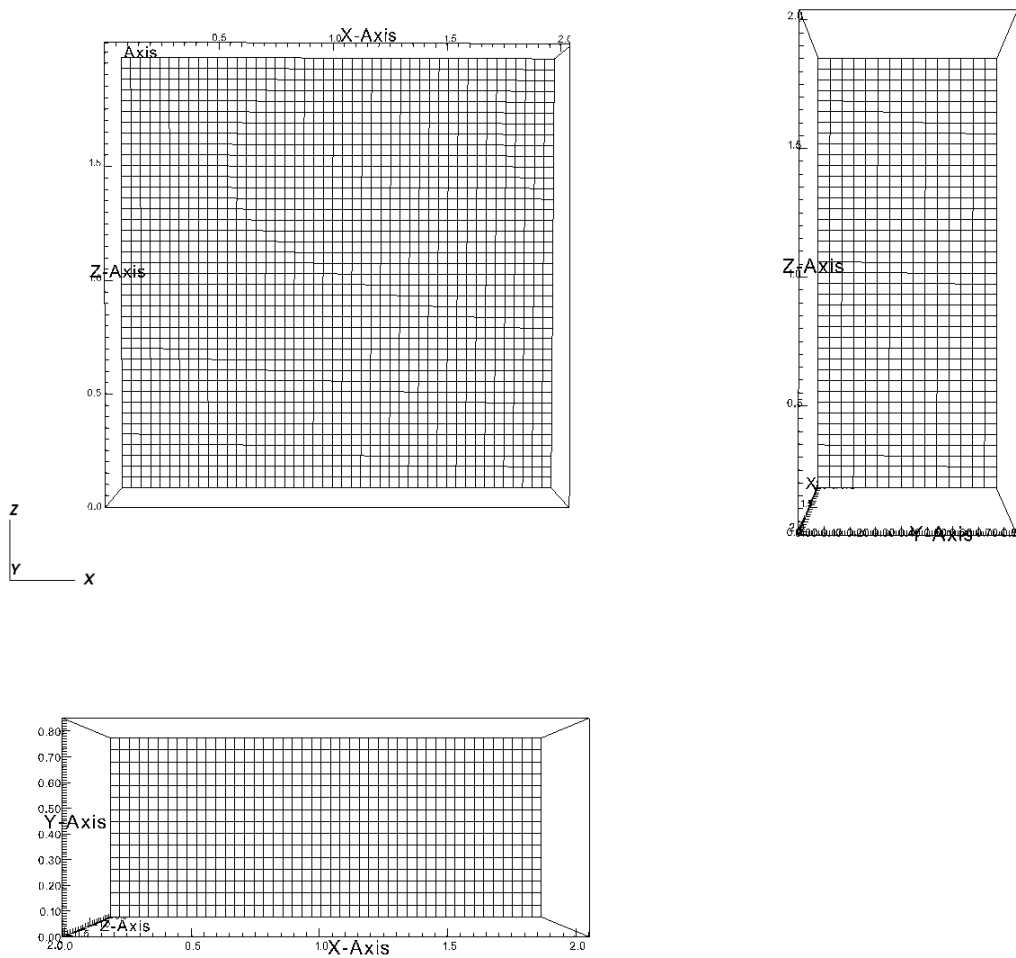
Ainda na FIGURA 3.6, ela indica com flechas azuis os pontos de entrada do ar, em temperatura ambiente, que ocorre nas portas frontais do gabinete; cada entrada conta com filtro, assim evitando a entrada de impurezas maiores. Já as flechas vermelhas indicam a saída do ar mais quente devido ao aumento de energia. A saída

FIGURA 3.7 - MALHA 3D



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 3.8 – DEFINIÇÃO DA MALHA POR EIXO



FONTE: O autor (2018)

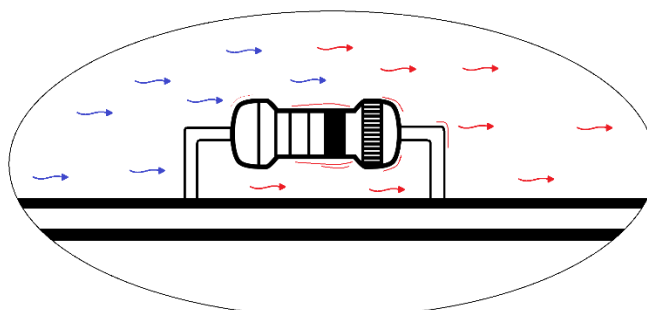
Para obter o modelo matemático, utilizou-se do método de elementos de volume. No qual o gabinete de telecomunicações fora dividido em 27.000 elementos de volume, com o propósito de aplicar a 1ª Lei da Termodinâmica com equações de massa e energia para cada elemento de volume, e ainda, caso se faça necessário, outras equações algébricas. Obtendo assim resposta térmica e psicométrica do sistema.

Neste caso de resfriamento de eletrônicos é necessário relacionar as formas de transferência de calor que ocorrem.

Condução exprime a transferência de calor via o contato físico, no gabinete proposto esta interação ocorre apenas nas paredes do gabinete, porém com pouco influência no resultado final.

O maior meio de troca térmica ocorre através da transferência por convecção, nela tem-se um fluido em movimento, há necessidade do movimento para caracterizar convecção, este movimento é ocasionado pelos ventiladores instalados no topo do gabinete de telecomunicações. O fluido refrigerante utilizado é o ar, que em movimento entra em contato com as faces aquecidas dos componentes que geram calor, ao exemplo um resistor, como pode ser visto na FIGURA 3.9 do lado esquerdo o ar é representado com setas de cor azul, indicando menor temperatura, ao cruzar o resistor aquecido o fluido recebe energia térmica pois encontra-se inicialmente a temperatura menor que a do componente elétrico, então após passar as setas são representadas na cor vermelha.

FIGURA 3.9 – CONVECÇÃO NO RESISTOR ELÉTRICO



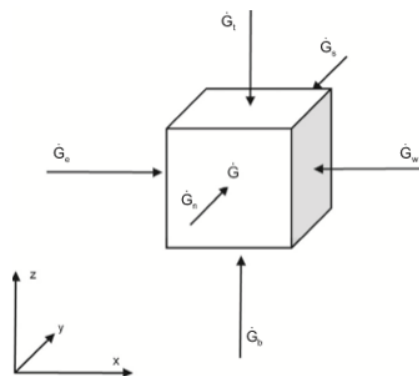
FONTE: O autor (2017)

3.2.2 Modelo matemático

Inicialmente são apresentadas equações generalizadas obtidas pelo método (MEV) desta forma facilitando a compreensão dos fenômenos envolvidos no gerenciamento térmico de gabinetes de telecomunicação. Posteriormente este modelo generalizado é mostrado de forma simplificada, porém já direcionando para modelagem de gerenciamento térmico de um gabinete de telecomunicações o qual contém um equipamento gerador de calor.

Para iniciar a retratar o modelo, deve-se, como já mencionado, ter em mente a separação do sistema em elementos de volume, para isso a FIGURA 3.10 expressa um elemento de volume com geometria quadrada (DILAY et al., 2014), o mesmo também pode ser retangular por exemplo, isto depende da análise do modelador, em ambas as situações cada elemento de volume contém seis faces de interação.

FIGURA 3.10– ELEMENTO DE VOLUME TÍPICO COM TAXAS DE INTERAÇÃO COM A VIZINHANÇA E TERMO FONTE



FONTE: Dilay et al., (2014)

O elemento delimitado pelo modelador interage com os elementos em contato com suas faces, e são representados pelos termos, \dot{G}_e , \dot{G}_w , \dot{G}_t , \dot{G}_b , \dot{G}_n e \dot{G}_s estes que indicam as taxas de variação de massa, calor ou qualquer variável de interesse em relação ao tempo e face de análise do EV. \dot{G} é um termo fonte na equação de transporte e também pode ser utilizado para representar geração de calor, resistência ao escoamento, transferência de massa entre fases entre outros (DILAY et al., 2014).

A primeira Lei da Termodinâmica pode ser descrita conforme abaixo.

$$\frac{dMcpT}{dt} = \dot{m}cp_1 T_{ent} - \dot{m}cp_1 T_{sai} + UA\Delta T \quad (3.3)$$

No entanto vale dividir todo lado direito da equação pelo cp agregado na derivada, resultando na seguinte equação.

$$\frac{d\rho VT}{dt} = \frac{\dot{m}cp_1 T_{ent}}{cp_2} - \frac{\dot{m}cp_1 T_{sai}}{cp_2} + \frac{UA\Delta T}{cp_2} \quad (3.4)$$

Modelando esta equação para um único elemento de volume e levando em consideração o termo fonte \dot{G} , obtém-se a seguinte equação de conservação de massa, energia, espécies etc (DILAY et al., 2014).

$$\frac{d(\rho VT)_i}{dt} = \sum_{j=e,w,t,b,n,s} \dot{G}_{j,i} + \dot{G}_i \quad (3.5)$$

O lado esquerdo da equação representa a acumulação, o qual é responsável para avançar a solução no tempo, em casos transiente, então o termo t representa o tempo, ρ expressa a densidade, V o volume. O termo \dot{G} pode referenciar outras contribuições como mostrado abaixo.

$$\dot{G}_{j,i} = \dot{G}_{adv,j,i} + \dot{G}_{dif,j,i} \quad (3.6)$$

A primeira contribuição G_{adv} representa termos advectivos, ou seja, convecção, e G_{dif} expressa os termos difusivos, sendo este, condução. Há ainda a possibilidade de outros tipos de interação como ao exemplo da radiação, neste caso, esta parcela de energia deve ser representada juntamente com o termo de difusivo.

Rearranjando a equação (3.5) com as considerações de (3.6)

$$\dot{G}_{adv,j,i} = \alpha_{j,i}(\dot{m}_{E,j} T_j - \dot{m}_{S,j} T_i) \quad (3.7)$$

Após rearranjada a equação (3.7) representa o balanço advectivo, através do elemento de volume (i), já considerando uma vazão mássica entrando e outra saindo, pela mesma face do EV, neste caso a face (j). Para encontrar a vazão mássica utilizam-se equações algébricas desenvolvidas a partir dos princípios de conservação de massa e quantidade de movimento, a qual também pode ser obtida por correlações empíricas e teóricas se disponíveis. O termo \dot{m}_E representa a taxa de massa que entra

no EV, a taxa de massa que sai é representada pelo termo \dot{m}_s e T é a temperatura na face desejada.

O termo α deve-se a divisão dos termos de calor específico, c_j é a parcela que cruza o EV, e c_i representa a substância que compõem o EV.

$$\alpha_{i,j} = \frac{c_j}{c_i} \quad (3.8)$$

$$\dot{G}_{\text{dif},j,i} = \dot{G}_{\text{other},j,i} + A_j \Gamma_j^\phi (T_j - T_i) \quad (3.9)$$

A equação (3.9) é o balanço dos fluxos difusivos, e como já mencionado, é neste ponto que deve ser acrescentado a radiação, no termo $\dot{G}_{\text{other},j,i}$ caso exista interação no sistema a ser modelado. O termo A representa a área da face. O termo de radiação é expresso exclusivamente na equação (3.10) abaixo.

$$\dot{Q}_{\text{rad},i,j} = A_{i,j} \{ \alpha_j I - \varepsilon_j \sigma (T_{i,j}^4 - T_{\text{ext}}^4) \}, \quad j = e, w, n, s, t, b \quad (3.10)$$

O primeiro termo nos colchetes representa a porção da radiação solar média absorvida pela face do EV onde houver incidência solar, α e ε são consecutivamente a absorvidade e emissividade da face EV, σ representa a constante Stefan-Boltzmann, já $A_{i,j}$ é a área de contato da face do EV. Quando a face do EV está em contato com algum material que bloqueia a transferência de calor por radiação, considera-se que $I = 0$.

$$\dot{G} = \frac{V_i}{c_i} S \phi, \quad j = e, w, t, b, n, s \quad (3.11)$$

Por fim a equação (3.11) aborda o termo fonte, nele deve ser acomodado todos os outros termos, necessários ao problema físico do sistema em análise.

A Tabela 3.3 apresenta valores os termos utilizados nas equações acima de acordo com a circunstância de cada sistema físico, representando as equações de conservação de massa, energia e espécies.

TABELA 3.3– VALORES PARA EQUAÇÃO DE MASSA, ENERGIA E ESPÉCIES

| Equação de conservação | ϕ | c_i | c_j | Γ^ϕ | S^ϕ |
|-----------------------------|--------|-------|-------|----------------------|---------------------------|
| Massa | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Energia | T | c_i | c_j | U_j / c_i | $\dot{Q}_{gen,i} / V_i$ |
| Fração mássica da espécie q | Y_q | 1 | 1 | $\rho D_q / l_{i,j}$ | e. g., $\rho Y_1 \mu R_q$ |

FONTE: Adaptado de Dilay.et al., (2014)

U_j é o coeficiente global de transferência de calor entre os dois EV em contato. Como abordado as equações gerais apresentadas acima podem ser aplicadas para vários tipos de sistemas e quantas vezes forem necessárias, sempre observando quais dos coeficientes da Tabela 3.3 são compatíveis com o sistema a ser analisado.

Abaixo a FIGURA 3.11 demonstra a caráter visual a comunicação entre os elementos, isso conhecendo o a direção e sentido dos vetores de massa neste exemplo.

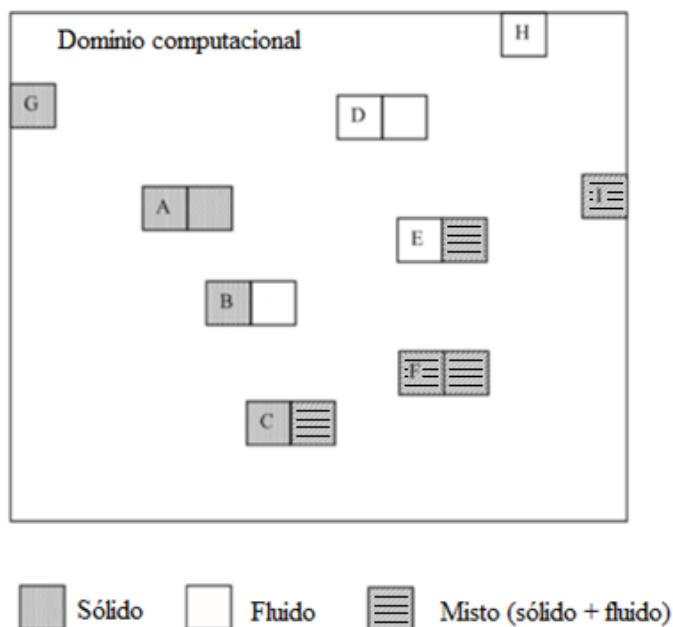
FIGURA 3.11– EV. BALANÇO



FONTE: Adaptado de Dilay.et al., (2014)

Dentre as características do método de elementos de volume, há uma delas que deve ser evidenciada. Esta característica consiste na possibilidade de coexistir em um mesmo domínio computacional três tipos de elementos, ou seja, é possível considerar o EV como sendo sólido, fluido e ainda a mistura dos dois, e todos interagem dentro do mesmo domínio computacional em uso. Com isso fica possível entender que podem existir três (03) tipos de elementos de volume, porém isto resulta em seis (06) interações possíveis entre os elementos, e ainda mais três outras interações que retratam o EV. com a fronteira.

FIGURA 3.12– TIPOS DE EV. E SUAS POSSÍVEIS INTERAÇÕES



FONTE: Adaptado de Dilay.et al., (2014)

Outro aspecto importante nesta mesma característica é a possibilidade que o método oferece para tratar o conteúdo que compõe o EV como uma única mistura homogênea de substâncias, e assim calcular por meio de uma média ponderada proporcional à massa as propriedades gerais do EV de forma uniforme. Ou então, tratar este mesmo EV como contendo um conjunto de entidades distintas, desta forma cria-se subsistemas para cada entidade separando e aplicando as equações para cada subsistema, sendo assim, para esta situação o mesmo elemento de volume poderá conter mais de uma EDO, e a quantidade ficará limitada pelo número de subsistemas criados dentro do EV sendo cada subsistema para um tipo de elemento.

Por fim deve-se ter prudência em relação a malha a ser gerada para o sistema. Este fator influencia diretamente na precisão dos resultados e no número de equações do modelo matemático, ou seja, quanto maior o número de EV, melhor será a resposta local do modelo, no entanto para cada novo EV um novo conjunto de equações é criado.

A fim de refinar a malha com o intuito de satisfazer os critérios estabelecidos, utiliza-se a equação (3.12) abaixo (DILAY, 2013). Através da mesma é possível criar uma malha capaz de convergir com maior precisão.

$$\varepsilon_{\text{mesh},i} = \frac{||\text{var}_i||_{\text{mesh1}} - ||\text{var}_i||_{\text{mesh2}}|}{||\text{var}_i||_{\text{mesh1}}} \leq 0.01 \quad (3.12)$$

Na equação o termo var_i configura cada incógnita do sistema (DILAY, 2013). A equação fornece uma maneira de refinamento, onde após o modelador já ter definido a primeira malha, o mesmo deve gerar uma segunda malha mais refinada e assim através da equação observar se a tolerância ficou menor ou igual a 1%, caso isto não ocorra, deve-se continuar refinando a malha, sempre analisando os resultados através da equação (3.12), até obter o valor de tolerância.

3.2.3 Modelo para gerenciamento térmico de gabinete de telecomunicações

Na elaboração do modelo matemático para sistemas como gabinetes de telecomunicações abordando a engenharia de sistemas foi tratado elementos dos três tipos, sólido, fluido e misto, no último, uma mistura de substâncias homogêneas em uma única fase, e as propriedades consideradas uniformes. Desta maneira este modelo pode ser utilizado para outros tipos de sistemas térmicos. Anteriormente já foram descritos os desafios do gerenciamento térmico, como a diretriz neste caso consiste em calcular os campos de temperatura e umidade relativa no interior do gabinete, é importante complementar que além dos desafios e temperaturas de trabalho fixadas por normas, é necessário levar em consideração os parâmetros de projeto e operação, tanto quanto aos fatores ambientais (DILAY et al., 2014).

O modelo tem como base a primeira Lei da Termodinâmica representada pela equação (3.3). Para satisfazer a conservação de massa o fluxo é determinado pela vazão dos ventiladores.

Para calcular a pressão de vapor inicial no EV, utiliza-se da seguinte expressão:

$$p_{V,i} = \varphi_{i0} \cdot p_{VS}(T_{i0}) \quad (3.13)$$

Na equação (3.13), $p_{VS}(T_{i0})$ representa a pressão de saturação da água a temperatura (T_{i0}) . Para a umidade absoluta em cada elemento de volume assume-se que se mantém aproximadamente constante. Então a umidade relativa no EV pode ser descrita conforme a equação a seguir:

$$p_{V,i} = \varphi_{i0} \cdot p_{VS}(T_{i0}) \quad (3.14)$$

Agora na equação (3.14) $p_{VS}(T_i)$ indica a pressão de saturação de água no EV na temperatura, T_i . Para EV sólidos, fluidos, ou uma mistura de ambos, a humidade relativa é ajustada para zero, isto é, $\varphi_i = 0$

Em relação a modelagem da taxa de transferência de calor utilizou-se de correlações empíricas para encontrar as taxas nas faces do elemento de volume. Antes deve-se observar se o EV em análise está em contato com outro elemento de volume ou está em contato com o exterior, para cada situação tem-se particularidades diferentes. Para os EV que tenham alguma face em contato com o exterior, analisa-se transferência por condução e convecção, o modelador deve verificar como ocorre a transferência de calor naquele ponto.

A taxa de transferência de calor total (radiação (se houver), condução e convecção) em cada face elemento é calculado a seguir na equação (3.15):

$$\dot{Q}_{i,j} = \dot{Q}_{rad\ i,j} + U_{i,j}A_{i,j}(T_{ext} - T)_i, \quad j = e, w, n, s, t, b \quad (3.15)$$

O coeficiente global de transferência de calor $U_{i,j}$ é elaborado na equação (3.16) abaixo:

$$U_{i,j} = \frac{1}{R_{i,j}} \quad (3.16)$$

$$R_{i,j} = \frac{1_{i,j}/2}{k_i} + \frac{t_w}{k_w} + \frac{1}{h_{ext}} \quad (\text{para elemento sólido}) \quad (3.17)$$

Ou:

$$R_{1,i} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{t_w}{k_w} + \frac{1}{h_{ext}} \quad (\text{para elemento fluido}) \quad (3.18)$$

Onde $1_{i,j}$ expressa a largura ou comprimento do EV, k_i representa a célula de condutividade térmica, t_w e k_w é a espessura da parede e a condutividade térmica respectivamente, h_{int} e h_{ext} indicam o coeficiente convectivo de transferência de calor

por convecção internos e externos. O coeficiente h da transferência de calor é demonstrado na equação (3.19)

$$h = \frac{k_f}{H} \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_H^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.19)$$

O termo k_f representa a condutividade térmica do fluido, Pr é o número de Prandtl do fluido, $Ra_H = (g\beta/\alpha_T v)H^3 |T_{neigh,i} - T_i|$, e g indica a aceleração da gravidade, β o coeficiente de expansão volumétrica do fluido, α_T representa a difusividade térmica do fluido, já v é a viscosidade cinemática do fluido; $T_{neigh,i}$ é a temperatura do EV vizinho ou a temperatura na fronteira com o exterior do sistema, H a altura total do EV sólido analisado. A equação (3.19) é válida para todas as faixas de número de Rayleigh laminar, de transição, e para propriedades de fluido turbulentos como avaliadas na temperatura de filme, tem: $T_{film} = (T_{neigh,i} + T_i) / 2$.

Para convecção forçada escreve-se as seguintes equações (3.20) e (3.21):

$$h = \frac{k_f}{L} (0.064 Pr^{1/3} Re_L^{1/2}), \text{ para } Re_L < 5 \times 10^5 \quad (3.20)$$

Ou

$$h = \frac{k_f}{L} \{0.037 Pr^{1/3} (Re_L^{4/5} - 23,550)\}, \text{ para } Re_L < 5 \times 10^5 \quad (3.21)$$

Então $Re_L = v_f L / \nu$, sendo v_f a velocidade do fluido, L o comprimento do EV em análise.

No entanto quando o EV está em contato com outro EV, tem-se outras considerações. Em sistemas térmicos assume-se a ausência de fluxo em um limite de fluido/fluido na direção horizontal quando trata-se apenas de convecção natural, sendo assim, tem-se fluxo somente na direção vertical. Já com convecção forçada, admite-se no modelo a possibilidade de arrefecimento através de um fluxo transversal, sendo na direção do fluxo forçado, estimado aproximadamente por um campo de velocidade. Então quando a interface dos EV's é fluido/fluido ou sólido/sólido, sob convecção natural, apenas a condução ocorre entre elementos adjacentes, devido a definição de não ter fluxo horizontal. Já quando existe uma interação fluido/equipamentos a transferência de calor na face do EV pode ser governada por

convecção. Na condição de interação fluido/fluido, também sem fluxo na direção horizontal, a taxa de transferência de calor é determinada com a seguinte equação (3.22):

$$\dot{Q}_{1,i} = U_{1,i}A_{1,i}(T_i - T_a), \quad l = e, w, n, s \quad (3.22)$$

E o termo $U_{1,i}$ é dado abaixo na equação (3.23):

$$U_{1,i} = \frac{k_f}{(l_{m,i} + l_{m,a})/2} \quad (3.23)$$

$l_{m,i}$ e $l_{m,a}$ representam o comprimento da célula ou a largura, de acordo com $m = x$ ou y , se o i -th ou a -th da face lateral do EV é leste/oeste ou norte/sul, respectivamente. Na equação (3.24) a seguir tem-se a transferência de calor quando o contato for sólido/sólido:

$$U_{1,i} = \frac{1}{\frac{l_{m,i}/2}{k_i} + \frac{l_{m,a}/2}{k_a}} \quad (3.24)$$

Nos casos onde o contato é fluido/sólido a transferência de calor por convecção ocorre, e a equação (3.22) é usada com o coeficiente de transferência de calor $\dot{Q}_{1,i}$ expresso na equação (3.25) abaixo:

$$U_{1,i} = C_a \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{l_{m,c}/2}{k_c}} \quad (3.25)$$

O termo c que surge na equação representa o número do elemento, $C_a = S_{\text{real}} / S_{\text{malha}}$ que indica o fator de correção para a área de superfície de convecção, onde S_{real} é a superfície convectiva do componente sólido e S_{malha} a área de superfície do componente representado na malha. Com isso o fator de C_a permite que a superfície simulada convectiva tenha a mesma área de superfície com o componente real. Para componentes que contenham aletas esta consideração se faz muito útil, permitindo que a representação da malha possa diferir em mais de 100% para o equipamento real.

Para a outra situação, ou seja, quando se tem a face superior/inferior do EV em contato com outro EV, é importante avaliar algumas considerações que estão descritas no decorrer do texto.

Como já descrito anteriormente, pode haver três tipos de interação entre os EV's, deve ser tido em conta: (i) fluido/fluido; (ii) fluido/sólido; e (iii) sólido/sólido. Para a primeira situação (i) fluido/fluido, sendo assim os dois EV são formados por fluido e o fluxo de calor é dada pela equação (3.26):

$$\dot{Q}_{1,i} = \dot{m}_{1,i} c_{p,f} (T_a - T_i), \quad l = t, b \quad (3.26)$$

Tendo $\dot{m}_{1,i} = \rho_f v_i (A_{1,i} / 2)$.

Por convecção natural, a estimativa da velocidade do fluido que atravessa a superfície do EV pode ser representada por $v_i = \alpha_T [(g\beta/\alpha_T \nu) |T_a - T_i| H]^2$, sendo uma escala representativa para convecção natural. Por suposição entende-se que metade da face superior ou inferior de um elemento é atravessada por um fluxo na direção vertical para cima, e a outra metade em sentido contrário, um representando a entrada no EV e outra a saída. Para convecção forçada a equação (3.26) é usada com um campo de velocidade aproximada v_i (por exemplo, ventilador ou ar-condicionado) cruzando o domínio na direção horizontal, sendo assim será necessário comparar v_i e v_f . Caso a velocidade oriunda a convecção natural for maior do que o campo de velocidade aproximado, é então utilizada a velocidade por convecção natural; caso a velocidade devida a convecção natural encontrada for menor, o campo de velocidade aproximado é apropriado.

Para o segundo caso (ii) fluido/sólido tem-se que o fluxo de calor que atravessa a parte superior ou inferior é dirigida pela equação já descrita (3.22), com o termo $l = t, b$; e para calcular $U_{1,i}$ tem-se a equação (3.25) com $l_{m,c}$ substituído por $l_{z,c}$.

No último caso (iii) sólido/sólido o fluxo de calor também é calculado pela equação (3.22) no entanto com $U_{1,i}$ calculado pela equação (3.24) sendo $l = t, b$. Já os comprimentos $l_{m,i}$ e $l_{m,a}$ são consequentemente substituídos por $l_{z,i}$ e $l_{z,a}$.

Por fim através do modelo matemático realizado pelo Método de Elementos de Volumes foi elaborado um programa em código Fortran® 95, consequentemente para interface Linux para Windows foi utilizado o programa Cygwin64 e os resultados numéricos foram convertidos em imagens gráficas através do programa VisIt 2.12.2.

3.3 AJUSTE DO MODELO MATEMÁTICO

Para ajustar o modelo matemático, utiliza-se um primeiro conjunto de dados específicos, em seguida as condições correspondentes auxiliam um segundo conjunto de dados que também são computacionalmente simulados com o modelo ajustado para verificar a concordância entre os resultados numéricos e experimentais, com intuito de validar experimentalmente o modelo matemático (DILAY et al., 2014).

Os dados iniciais foram definidos, tais como os de temperaturas iniciais e propriedades físicas do gabinete

Para temperaturas iniciais as informações estão demonstradas na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – VALORES INICIAIS DE TEMPERATURA

| Descrição da Temperaturas: | Incóg.: | Valor: |
|--|----------------|---------------|
| Temperatura inicial | tp-0 | 338,15 K |
| Temperatura externa inicial em todas as regiões do sistema | tpout | 338,15 K |
| Temperatura do ar externo | tpair | 338,15 K |
| Temperatura do solo | tground | 338,15 K |

Fonte: O autor (2017)

As propriedades físicas definidas estão demonstradas na Tabela 3.5.

TABELA 3.5 – PROPRIEDADES FÍSICAS

(continua)

| Propriedade | Incóg.: | Valor: |
|---|----------------|-------------------------|
| Densidade do ar | rhoair | 1.165 kg/m ³ |
| Combinação de propriedades de ar para convecção natural | gban | 9.07e+07 |
| Calor específico a volume constante do ar | cvair | 700 J/kg.K |

(conclusão)

| Propriedade | Incóg.: | Valor: |
|--|----------------|------------------------|
| Calor específico a pressão constante do ar | cpair | 1000 J/kg.K |
| Condutividade térmica do ar | rkair | 0.026 W/m.K |
| Condutividade térmica da parede | rkwall | 100 W/m.K |
| Viscosidade dinâmica do ar | visair | 2e-05 Pa.s |
| Número de Prandtl para o ar | pr | 0.72 (momento/térmico) |
| Absorção de parede (entre 0 e 1) | alf | 0.9 |
| Emitância da parede (entre 0 e 1) | epsi | 0.9 |
| Densidade do material da parede | rhoal | 2700 kg/m ³ |
| Calor específico do material da parede | cal | 910 J/kg.K. |

Fonte: O autor (2017)

A seguir estão demonstrados os três pacotes de dados dos parâmetros específicos que sofreram variação. Os parâmetros foram variados a fim de simular as diversas condições de uso, um parâmetro entre eles é considerado mais relevante, trata-se da potência da resistência elétrica. Através deste parâmetro são representados os equipamentos eletrônicos no interior do gabinete de telecomunicações, quanto mais alta a potência da resistência elétrica, maior é o calor fornecido ao sistema, igualmente na prática, quanto maior a quantidade de equipamentos eletrônicos, maior calor gerado. A Tabela 3.6 relaciona apenas o parâmetro da potência da resistência elétrica variada em cada condição de simulação.

TABELA 3.6 - POTÊNCIAS UTILIZADAS

| | Potência dissipada da Resistência Elétrica |
|-----------------|---|
| Pacote 1 | 1600 Watts |
| Pacote 2 | 3000 Watts |
| Pacote 3 | 4225 Watts |

Fonte: O autor (2018)

A vazão de ar que circula o gabinete de telecomunicações também é uma variável de importância, neste parâmetro é possível simular a variação do fluxo de ar imposta pelos ventiladores no gabinete assim aumentando a transferência de calor.

A velocidade do ar na direção do eixo y (u_y) foi ajustada, conforme equação (3.27), em acordo com o fluxo gerado pelos dois ventiladores instalados no topo do gabinete de telecomunicações. Onde Q representa a Vazão em m^3/s , A indica a área por onde cruza o fluxo e V a velocidade em m/s.

$$Q = A \cdot V \quad (3.27)$$

Na Tabela 3.7 são demonstrados os valores do fluxo de ar no interior do gabinete (área transversal do gabinete) e também na saída dos ventiladores, oriundos da área dos próprios ventiladores pela quantidade de ventiladores.

TABELA 3.7 – VELOCIDADE DO AR NA DIREÇÃO Y

| Local do fluxo | Qtde de ventiladores: | Veloc.: |
|------------------------------|-----------------------|-----------|
| Área transversal do gabinete | 1 | 0.142 m/s |
| | 2 | 0.284 m/s |
| | 4 | 0.569 m/s |
| Área dos ventiladores | 1 | 8.433 m/s |
| | 2 | 16.87 m/s |
| | 4 | 33.73 m/s |

Fonte: O autor (2017)

Com os dados demonstrados, três pacotes de dados foram simulados. Com a potência da resistência elétrica ajustada no valor de 1600 W foi utilizado a capacidade de um ventilador, já com potência igual a 3000 W dois ventiladores e por fim com 4225 W de potência foram 4 ventiladores simulados.

4 RESULTADOS

Para melhor organização, primeiro são apresentados os resultados experimentais e em seguida os resultados computacionais. Posteriormente os mesmos são demonstrados de forma comparativa.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais consistiram em analisar as respostas térmicas do gabinete de telecomunicações, submetido a temperatura externa constante que pode ser variada, variando também a potência da resistência elétrica e o fluxo de ar no interior do gabinete através da quantidade de ventiladores instalados. Com estes testes é possível encontrar três variáveis de interesse:

- Temperatura média no interior do gabinete de telecomunicações em regime estacionário;
- Desempenho da troca de calor com o calor gerado pela resistência em relação a convecção forçada simulado pelos ventiladores do gabinete de telecomunicações;
- Desempenho de troca térmica com a variação do fluxo de ar, aumentando o número de ventiladores no sistema de exaustão do gabinete de telecomunicações.

Para ajuste do modelo matemático foram utilizados dois pacotes de testes térmicos realizados no LMH, o pacote principal possui seis testes experimentais.

Na Tabela 4.1 encontram-se os resultados principais dos testes conforme variação dos parâmetros de operação:

TABELA 4.1 – RESULTADOS PACOTE DE TESTES 1

(continua)

| Bastidor PA 2000 | | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 |
|-----------------------------------|------|----------------|----------------|----------------|
| Ventiladores | | 1 | 2 | 4 |
| Potência dissipada | [W] | 1600 | 3000 | 4225 |
| Temperatura média interna T_m | [°C] | 56,69 | 55,46 | 51,32 |
| Temperatura média da câmara T_c | [°C] | 44,86 | 44,61 | 44,74 |

(conclusão)

| Bastidor PA 2000 | | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 |
|-------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|
| Delta ΔT | [°C] | 11,83 | 10,85 | 6,58 |
| UA | [W/K] | 135,24 | 276,38 | 642,21 |

Fonte: UFPR (2016)

Na Tabela 4.2 são apresentadas as temperaturas médias internas do gabinete de telecomunicações em todos os 17 termistores contidos no gabinete, também é mostrada a temperatura média da câmara térmica, representados na tabela a partir do termistor 24.

TABELA 4.2 - RESUMO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS OBTIDAS DURANTE OS TESTES
(continua)

| Ponto | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| T ₀ | 54,71 | 55,27 | 50,94 |
| T ₁ | 55,83 | 50,79 | 46,30 |
| T ₂ | 55,60 | 55,83 | 52,44 |
| T ₃ | 58,30 | 57,24 | 52,41 |
| T ₄ | 57,36 | 58,58 | 54,61 |
| T ₅ | 62,26 | 60,74 | 55,70 |
| T ₆ | 45,98 | 42,05 | 42,99 |
| T ₇ | 62,04 | 61,25 | 55,70 |
| T ₈ | 58,11 | 57,40 | 50,79 |
| T ₉ | 42,83 | 42,01 | 48,51 |
| T ₁₀ | 47,00 | 48,12 | 49,55 |
| T ₁₁ | 48,40 | 44,46 | 42,57 |
| T ₁₂ | 56,56 | 54,27 | 44,97 |
| T ₁₃ | 55,40 | 51,22 | 46,87 |
| T ₁₄ | 47,02 | 48,88 | 47,25 |
| T ₁₅ | 55,73 | 50,79 | 44,86 |
| T ₁₆ | 45,93 | 45,13 | 42,16 |
| T ₂₄ | 43,19 | 43,18 | 39,95 |
| T ₂₅ | 44,68 | 50,46 | 46,56 |

| Ponto | Teste 1 | Teste 2 | (conclusão) |
|---|---------|---------|-------------|
| | | | Teste 3 |
| T ₂₆ | 48,87 | 46,34 | 43,33 |
| T ₂₇ | 46,31 | 42,11 | 40,32 |
| T ₂₈ | 39,34 | 36,49 | 51,19 |
| T ₂₉ | 47,47 | 40,66 | 39,67 |
| T ₃₀ | 44,15 | 52,99 | 52,19 |
| Temperatura média da câmara | 44,86 | 44,61 | 44,74 |
| Temperatura média interna do compartimento frontal | 56,69 | 55,46 | 51,32 |

Fonte: UFPR (2016)

4.2 RESULTADOS - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para convergência do modelo, em acordo com a equação (3.12) foi necessária uma malha com 27.000 elementos de volume representando o domínio computacional, lembrando que se trata de um modelo tridimensional. O número de elementos de volume por direção espacial é apresentado na Tabela 4.3 a seguir:

TABELA 4.3 – QUANTIDADE EV POR EIXO

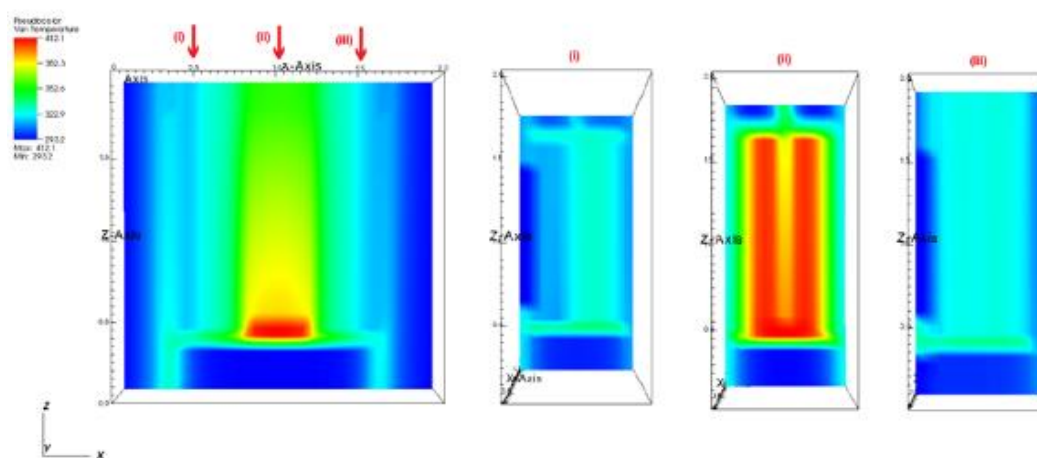
| Malha | Eixo correspondente | | |
|---------------|---------------------|-------|-------|
| | x | y | z |
| Dimensão (mm) | 1.974 | 0.850 | 2.048 |
| Número de EV | 45 | 15 | 40 |

Fonte: O autor (2017)

Posteriormente as simulações do comportamento térmico são convertidas em imagens tridimensionais através do software VisIt 2.12.2.

O primeiro pacote de dados é originado com a potência da resistência elétrica ajustada em 1600 W. As simulações foram geradas em estado estacionário. Na FIGURA 4.1 o gabinete de telecomunicações é dividido em quatro partes simétricas que originaram três pontos de cortes, após os cortes efetuados no eixo x a imagem resultante é rebatida ao lado da imagem do gabinete, possibilitando uma visão mais detalhada dos gradientes térmicos. O mesmo procedimento da demonstração será usado nas FIGURAS 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

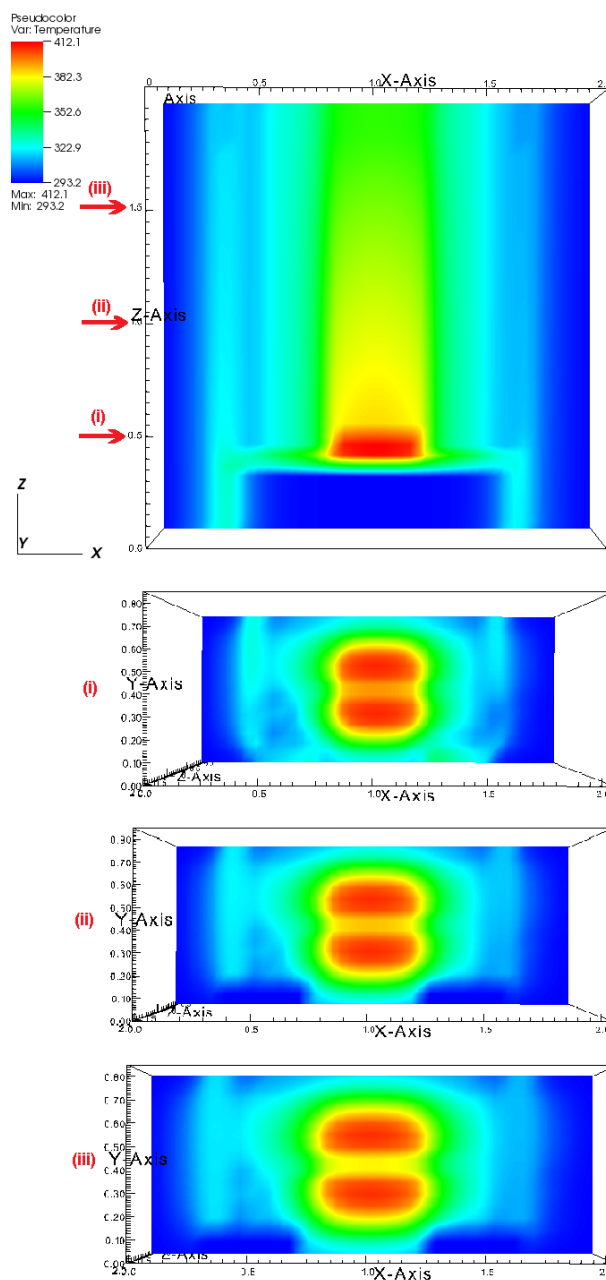
FIGURA 4.1 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 1600 W (CORTES EM X)



Fonte: O autor (2018)

A FIGURA 4.2 também representa a simulação de 1600 W, porém com os cortes efetuados no eixo z.

FIGURA 4.2 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 1600 W (CORTES EM Y)



Fonte: O autor (2018)

Nas simulações com a potência da resistência definida em 1600 W, foi ajustado no modelo o parâmetro da transferência de calor por convecção forçada, fixando em $uhp = 15$.

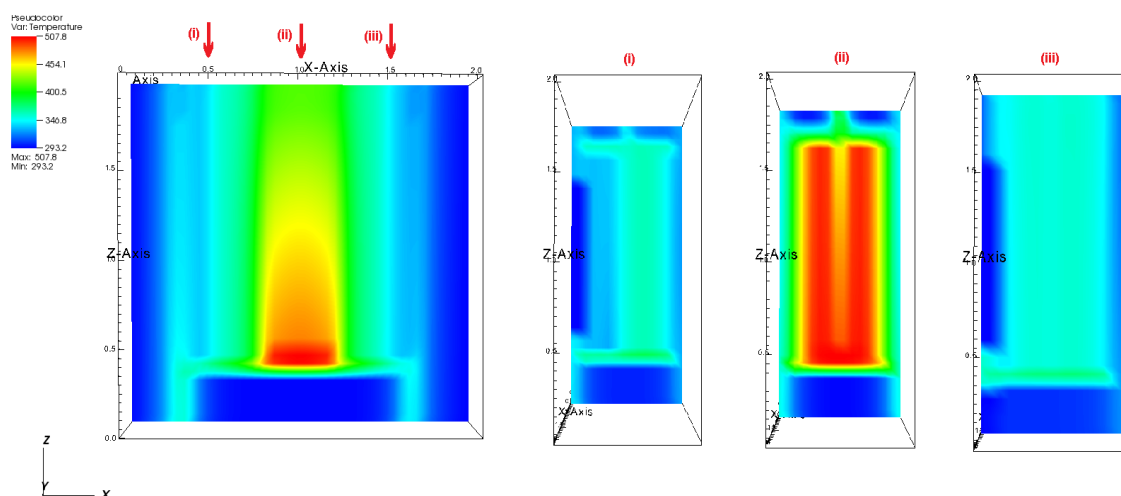
Todas as entradas de ar nos filtros e as saídas pelos ventiladores atendem a lei de conservação de massa, são três pontos de entrada de ar definidos no modelo matemático, igualmente é sistema físico. Enfim é possível verificar nas FIGURAS de

4.1 a 4.6 o fluxo de ar e os gradientes térmicos de maneira satisfatória, respeitando de forma similar o encontrado no modelo real. No entanto a propagação térmica no eixo x não ocorreu conforme esperado, isto será explicado no decorrer dos resultados.

Como esperado, as temperaturas próximas às extremidades do sistema são inferiores às temperaturas na região do centro do armário (MENG et al., 2015).

Por conseguinte, a FIGURA 4.3 traz a simulação com a potência da resistência elétrica definida em 3000 W.

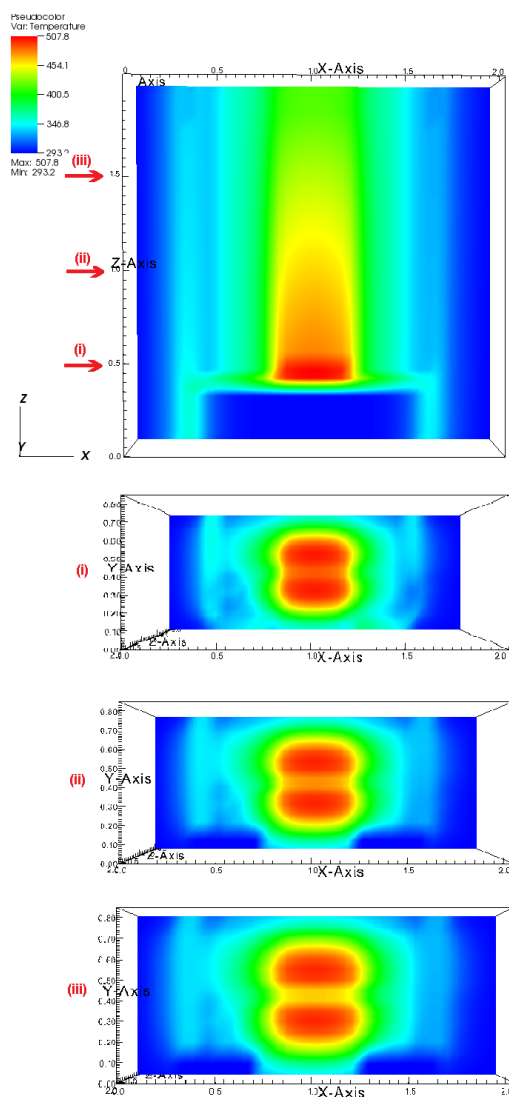
FIGURA 4.3 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 3000 W (CORTES EM X)



Fonte: O autor (2018)

Na FIGURA 4.4 os cortes efetuados no eixo Z.

FIGURA 4.4 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 3000W (CORTES EM Y)

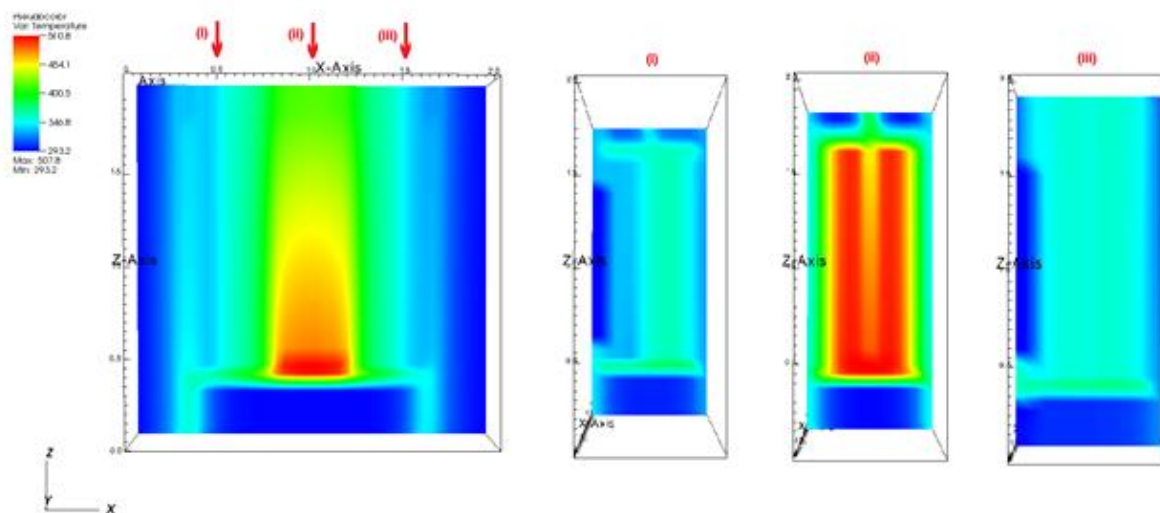


Fonte: O autor (2018)

Nas laterais onde existem placas de metal que impedem o fluxo de ar quente, a temperatura não altera significativamente.

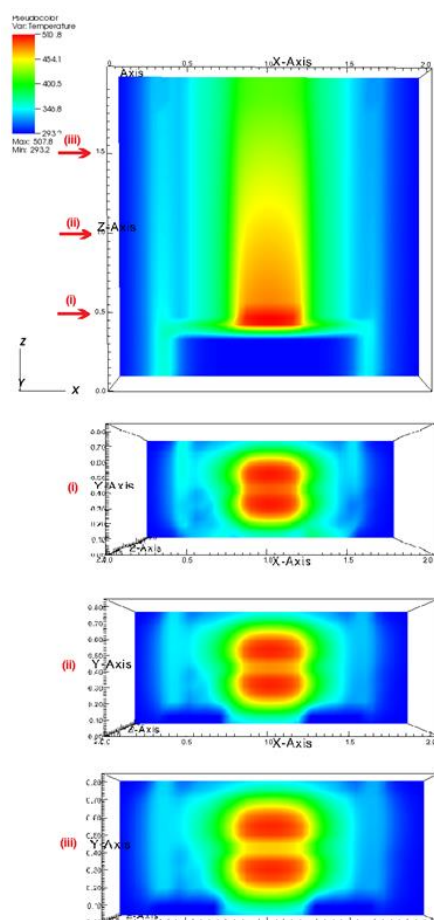
As FIGURAS 4.5 e 4.6 expressam os resultados com potência ajustada para 4225W.

FIGURA 4.5 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 4225W (CORTES EM X)



Fonte: O autor (2018)

FIGURA 4.6 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 4225W (CORTES EM Y)



Fonte: O autor (2018)

A progressão térmica ocorre do centro da resistência elétrica aos seus arredores, com a maior taxa sendo atraída pelos ventiladores no topo (RIGATTI; VARGAS; BALMANT, 2017). Observa-se também que a simulação computacional conseguiu representar com equidade os locais onde encontram-se a entrada de ar com temperatura inferior vindas dos filtros de ar.

4.3 RESULTADOS CORRELACIONADOS

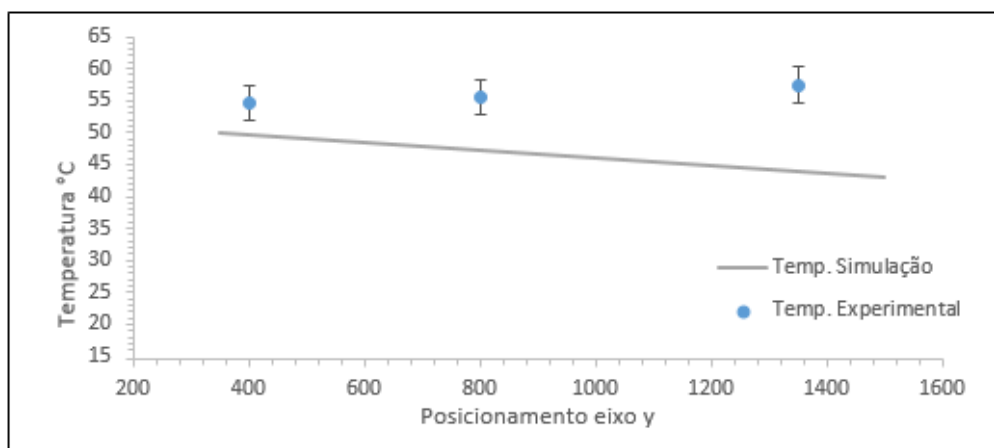
Com os dados experimentais coletados e os dados obtidos em simulação é possível correlacionar os valores com intuito de observar o comportamento de ambos quando comparados. Para atingir resultados de simulação compatíveis com os resultados encontrados na prática foi necessário ajuste dos parâmetros de simulação.

Todos os gráficos apresentados a seguir foram elaborados com os valores de temperaturas no eixo das abscissas e a extensão vertical do gabinete está representado no eixo das ordenadas em milímetros. A temperatura interna do

gabinete fora analisada no sentido vertical nos dois lados do gabinete. Para a análise vertical esquerda, foi utilizado os dados de temperatura coletados pelos termistores T0, T2 e T4, já no lado direito os dados foram coletados pelos termistores T1, T3 e T5.

O GRÁFICO 4.1 trata da análise vertical esquerda com a potência da resistência em 1600W.

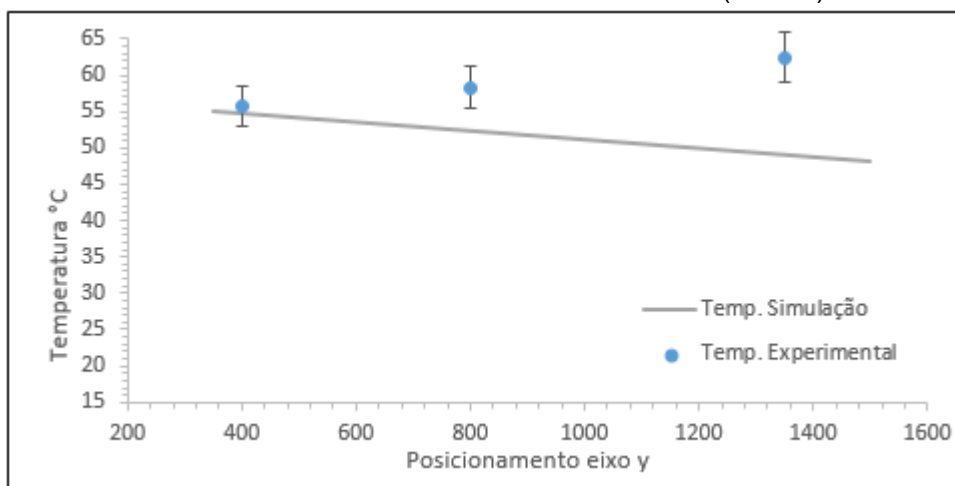
GRÁFICO 4.1 – ANÁLISE VERTICAL ESQUERDA (1600W)



Fonte: O autor (2018)

O GRÁFICO 4.2 retrata a mesma análise do GRÁFICO 4.1, porém é averiguada a temperatura no lado direito do gabinete.

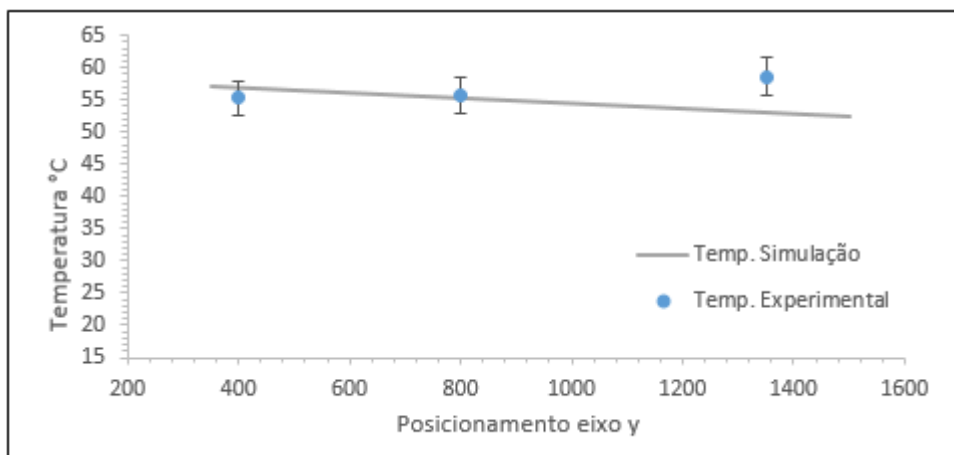
GRÁFICO 4.2 – ANÁLISE VERTICAL DIREITA (1600W)



Fonte: O autor (2018)

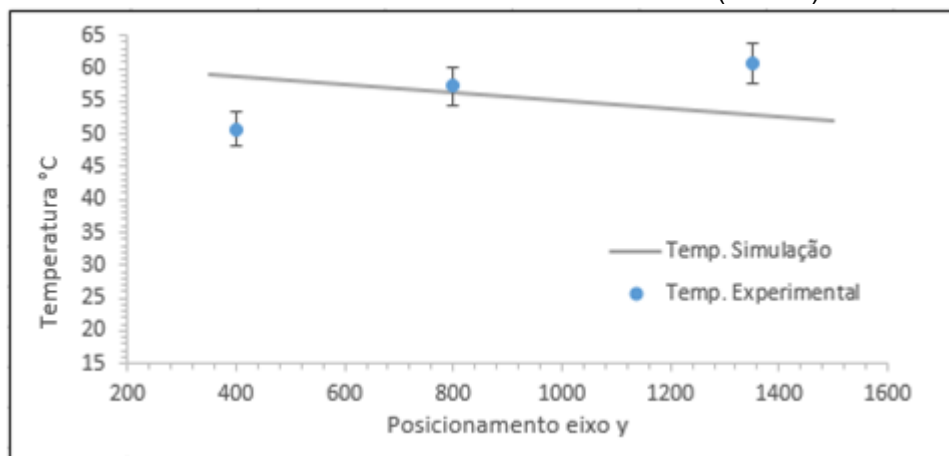
Para a potência de 3000W tem-se o GRÁFICO 4.3 abordando o lado esquerdo e o GRÁFICO 4.4 o lado direito.

GRÁFICO 4.3 – ANÁLISE VERTICAL ESQUERDA (3000W)



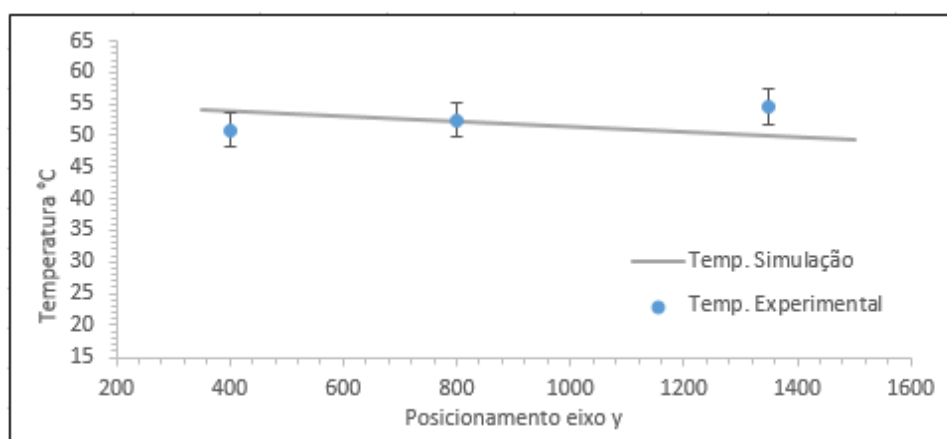
Fonte: O autor (2018)

GRÁFICO 4.4 – ANÁLISE VERTICAL DIREITA (3000W)



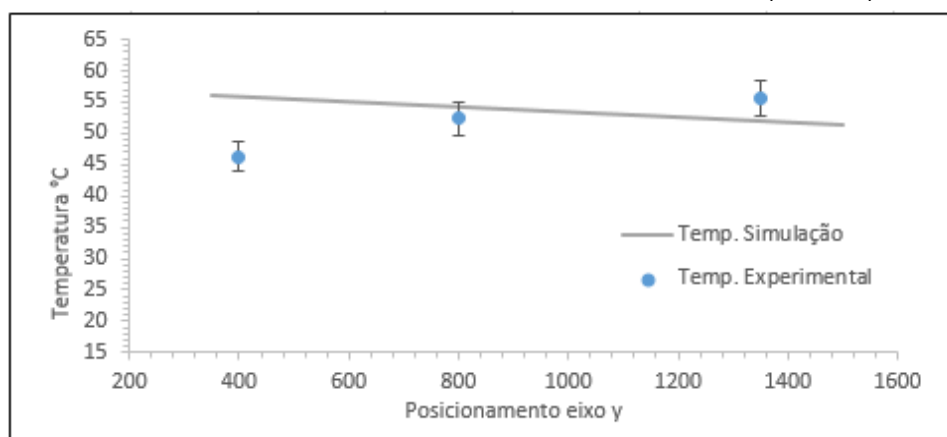
Fonte: O autor (2018)

GRÁFICO 4.5 – ANÁLISE VERTICAL ESQUERDA (4225 W)



Fonte: O autor (2018)

GRÁFICO 4.6 – ANÁLISE VERTICAL DIREITA (4225 W)



Fonte: O autor (2018)

No teste experimental a temperatura é mais elevada na região do topo do gabinete de telecomunicação, o que já era esperado, pois o ar aquecido sofre expansão ficando desta forma com menor densidade que o ar frio assim permanecendo nas regiões mais altas, fenômeno de acúmulo de calor. Porém o mesmo não ocorreu na simulação computacional. Este fenômeno deveria ser considerado no modelo matemático, comentários a seguir.

Nos EV's sólidos a propagação térmica é maior devido a condutividade térmica mais elevada destes materiais, no entanto estes equipamentos oferecem maior inércia térmica. Os resultados demonstraram que a temperatura dos EV's sólidos que geralmente são componentes elétricos variam significativamente conforme os parâmetros de aquecimento, no entanto a temperatura média do ar interno varia apenas ligeiramente para os diferentes modos de aquecimento. Esta consideração é importante uma vez que analisar os gradientes térmicos apenas pela média da

temperatura do ar interno pode omitir as altas temperaturas nos componentes (DILAY et al., 2014).

É importante observar nos resultados experimentais o valor de transferência de calor UA (W/K) mostrados na Tabela 4.1, com valores menores de resistência elétrica, porém com baixo fluxo de ar, a transferência de calor é menor, ou seja, pode-se aumentar o valor da resistência elétrica, desde que seja aumentando também o fluxo de ar. Um fluxo de ar adequado é capaz de permitir que um modelo matemático simplificado possa reproduzir previsões térmicas precisas (DILAY et al., 2014).

Contudo percebeu-se que tanto nas respostas numéricas quanto nas experimentais alguns pontos do gabinete de telecomunicações ultrapassaram o valor máximo de temperatura estabelecidos pela norma ETSI EN 300 019-2-4 em até 7 °C, com a maior divergência nos testes a 1600W.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, um estudo numérico e experimental foi realizado para obter uma ferramenta computacional de simulação de gerenciamento térmico capaz de fornecer respostas rápidas e com precisão satisfatória para estudos em engenharia de sistemas, estes sistemas devem interagir uns com os outros por transferência de massa e energia. Com esta ferramenta é possível simular de forma rápida o sistema, auxiliando na investigação para máxima transferência de calor em sistemas de empacotamento de eletrônicos.

- i) Foi definido um gabinete de telecomunicações do qual foi utilizado nos estudos. Um experimento foi conduzido no Laboratório de Maquinas Hidráulicas – LMH.
- ii) Então fora desenvolvido um modelo matemático para modelar o gerenciamento térmico em sistema de empacotamento de eletrônicos, neste caso resfriado pela circulação de ar forçada.
- iii) O Método de Elementos de Volume foi utilizado na elaboração do modelo matemático, permitindo uma formulação simples que depende de pouco tempo computacional, mas que permita obter respostas de temperatura e umidade relativa e ainda simular o sistema com variados parâmetros e configurações diferentes, independentemente da diversidade dos componentes do sistema, pois esta metodologia permite a interação de elementos do tipo sólidos, fluidos e a mistura de ambos em um mesmo sistema, todos dependentes das propriedades físicas dos materiais selecionados pelo modelador. O tempo médio necessário para simulação em estado estacionário foi em torno de 290 s.
- iv) Os resultados numéricos obtidos com o modelo matemático foram então ajustados com os resultados dos experimentos observando os dados de temperatura e umidade relativa.
- v) Com o modelo matemático ajustado experimentalmente, conclui-se que o modelo pode ser utilizado como solução para a simulação de gerenciamento térmico em gabinetes de telecomunicações refrigerados a ventilação forçada, garantindo precisão e baixo tempo computacional. No entanto o modelo ainda precisa ser melhorado para contemplar a propagação térmica no eixo x em relação ao deslocamento no eixo y,

assim diminuindo o erro entre as respostas que ficaram acima dos 5 % considerados ideais.

Por fim observou-se com o estudo que o gabinete analisado ultrapassou experimentalmente em 7 °C e numericamente em 4 °C a temperatura máxima estipulada pela norma internacional ETSI EN 300 019-2-4, já mostrando que a simulação conseguiu representar um parâmetro de risco que deve ser ajustado na operação do gabinete.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda há muito que possa ser feito para melhorar o gerenciamento térmico utilizando metodologias não comuns. Na ferramenta proposta por esta dissertação alguns pontos podem ser levantados para serem readequados no futuro:

É sugerido que durante a análise inicial do comportamento do gradiente térmico seja incluindo no modelo velocidades do fluxo de ar na direção perpendicular ao fluxo comum do sistema, permitindo assim regiões mais aquecidas nas extremidades ou homogeneidade crescente com acúmulo de calor no topo. Uma maneira de contemplar é definindo $u_x = u_x(z)$, sendo u_x a velocidade na direção perpendicular ou horizontal ao gabinete de telecomunicações dependente da componente vertical z .

Por fim esta ferramenta se mostrou eficaz no tema proposto, conforme demonstrado nesta dissertação, então é possível aproveitá-la melhor, ao exemplo de realizar otimizações no sistema, pode-se aqui destacar duas simulações que são sugeridas para futura elaboração, uma delas é a otimização da geometria física do gabinete de telecomunicações visando máxima transferência de calor devido seu *design*. Outra possível otimização a ser realizada é estudar também a máxima transferência de calor em função do ajuste ideal entre a capacidade de fluxo de ar em relação ao calor gerado pela resistência elétrica com o volume fixo.

REFERÊNCIAS

ALAOUI, C.; SALAMEH, Z. M. A Novel Thermal Management for Electric and Hybrid Vehicles. **IEEE transactions on vehicular technology**, v. 54, n. 2, p. 468 – 476, 2005.

ANAND, N. K.; KIM, S. H.; FLETCHER, L. S. The effect of plate spacing on free convection between heated parallel plates. **Journal of heat transfer**, EUA, v. 114, n. 2, p. 515-518, 1992.

ANDRESEN, M.; LISERRE, M. Impact of active thermal management on power electronics design. **Microelectronics reliability**, v. 54, Ed. 9-10, p. 1935–1939, 2014.

BAGNOLI, P. E. et al. A thermomechanical solver for multilayer power electronic assemblies integrated into the DJOSER thermal simulator. **Journal of electronic packaging**, v. 133, n. 1, p. 11005, 2011.

BAR-COHEN, A.; KRAUS, A. D. **Advances in Thermal Modeling of Electronic Components and Systems**, v. 2, 1ª Ed. New York: ASME Press, 1990.

BAR-COHEN, A.; ROHSENOW, W. M. Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates, **Journal of heat transfer**, v. 106, p. 116-123, 1984.

BEJAN, Adrian. **Convection Heat Transfer**. 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

CAMPOS, Marcos Carvalho. Modelagem, simulação e otimização numérica e experimental de sistemas de resfriamento de equipamentos eletrônicos e motores stirling. 2004. 114 f. **Tese de Doutorado**- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DIAS, F. G. et al. Notional all-electric ship thermal simulation and visualization. **Electric ship technologies symposium, 2009**. ESTS 2009. IEEE, p. 539-546.

DILAY, E. et al. A volume element model (VEM) for energy systems engineering. **International journal of energy research**, v. 39, n. 1, p. 46-74, 2014.

DILAY, E. et al. The experimental validation of a transient power electronic building block (PEBB) mathematical model. **Applied thermal engineering**, v. 60, n. 1, p. 411-422, 2013.

DILAY, Emerson. Modelagem e simulação para engenharia de sistemas: acondicionamento de eletrônicos, navios elétricos e fotobiorreatores. 2013. 198 f. **Tese de Doutorado** - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ETSI EN 300 019-2-4 V2.2.1 (2003-03) European Standard (Telecommunications series) Environmental Engineering (EE); Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; Part 2-4: Specification of environmental tests; Stationary use at non-weatherprotected locations. Disponível em:
<http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300001_300099/3000190204/02.02.01_60/en_3000190204v020201p.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2018.

ETSI EN 300 753 V1.2.1 (2009-03) European Standard (Telecommunications series) Equipment Engineering (EE); Acoustic noise emitted by telecommunications equipment. Disponível em:
<http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300753/01.02.01_40/en_300753v010201o.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2018.

GOLDSTEIN, R.J. et al. Heat transfer – a review of 2000 literature. **International journal of heat and mass transfer**, v.45, p. 2853–2957, 2002.

HALL, Arthur David. **A methodology for systems engineering**. 1ª Ed. University of Michigan: Van Nostrand, 1962.

HONOUR, E. C. INCOSE: history of the International Council on Systems Engineering. **Systems Engineering**, v. 1, n. 1, p. 4-13, 1998.

IEC 60068-2-11:1981 BASIC ENVIRONMENTAL TESTING PROCEDURES - PART 2-11: TESTS - TEST KA: SALT MIST. Disponível em:
<<https://webstore.iec.ch/publication/504>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

IEC 61587-3:2013 Mechanical structures for electronic equipment - tests for iec 60917 and iec 60297 - part 3: electromagnetic shielding performance tests for cabinets and subracks. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/5636>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

KAISER, Kenneth L. **Electromagnetic compatibility handbook**. 1ª Ed. New York: CRC Press, 2004.

KIM, S. H.; ANAND, N. K.; FLETCHER, L. S. Free convection between series of vertical parallel plates with embedded line heat sources. **Journal of heat transfer**, v. 113, n. 1, p. 108-115, 1991.

KINCAID, D.; CHENEY, W. **Numerical analysis**. 1ª Ed. Belmont, CA: Cole Publishing Company, 1991.

MENG, X. Z. et al. Experimental and numerical investigation on thermal management of an outdoor battery cabinet. **Applied thermal engineering**, v. 91, p. 210-224, 2015.

ORDONEZ, J. C.; VARGAS, J. V. C.; HOVSAPIAN, R. Modeling and simulation of the thermal and psychrometric transient response of all-electric ships, internal compartments and cabinets. **Simulation**, v. 84, n. 8-9, p. 427-439, 2008.

PASQUIER, P.; MARCOTTE, D. Short-term simulation of ground heat exchanger with an improved TRCM. **Renewable energy**, v. 46, p. 92-99, 2012.

PETERSON, G. P.; ORTEGA, A. Thermal control of electronic equipment and devices. **Advances in heat transfer**, v. 20, p. 181-314, 1990.

RASHIDKHANOV, A. T.; YUSUFOV, S. A. Development of prototype system for regulating thermal conditions of telecommunications equipment cabinets. **Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences**, v. 44, n.2, p. 87-96, 2017.

RIGATTI, L. F.; VARGAS, J.V.C; BALMANT, W. Modeling and simulation of thermal management systems of electronic equipment. **International Congress of Mechanical Engineering**. COBEM, Curitiba, 2017.

ROSSETTI, A.; MINETTO, S.; MARINETTI, S. Numerical modelling and validation of the air flow maldistribution in the cooling duct of a horizontal display cabinet. **Applied thermal engineering**, v. 87, p. 24-33, 2015.

SAGE, ANDREW P. **Systems Engineering**. 1ª Ed. EUA: John Wiley & Sons, 1992.

SHAPIRO, B. Creating compact models of complex electronic systems: an overview and suggested use of existing model reduction and experimental system identification tools. **IEEE transactions on components and packaging technologies**, v. 26, n. 1, p. 165-172, 2003.

SOMAN, R. R.; DAVIDSON, E. M.; MCARTHUR, S. D. J. Using functional failure mode and effects analysis to design the monitoring and diagnostics architecture for the zonal MVDC shipboard power system. **IEEE electric ship technologies symposium**. ESTS 2009. IEEE, p. 123-128, 2009.

SONG, Z.; MURRAY, B. T.; SAMMAKIA, B. A compact thermal model for data center analysis using the zonal method. **Numerical heat transfer, part a: applications**, v. 64, n. 5, p. 361-377, 2013.

TIERNEY J. K.; KOCZKUR, E. Free Convection Heat Transfer from a Totally Enclosed Cabinet Containing Simulated Electronic Equipment. **IEEE transactions on parts, hybrids, and packaging**, v. 7, n. 3, p. 115-123, 1971.

TRIVELATO, Gilberto da Cunha. **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. São José dos Campos: INPE, 2003.

TSUZUKI, N.; KATO, Y.; ISHIDUKA, T. High performance printed circuit heat exchanger. **Applied thermal engineering**. v. 27, Ed. 10, p. 1702-1707, 2007.

UFPR. **Teste Térmico NK052130-A001 – teste 1**. Curitiba: UFPR/LMH, 2016.

UFPR. **Teste Térmico NK052130-A001 – teste 2**. Curitiba: UFPR/LMH, 2016.

VARGAS, J. V. C. et al. A numerical model to predict the thermal and psychrometric response of electronic packages. **Journal of electronic packaging**, v. 123, n. 3, p. 200-210, 2001.

VARGAS, J. V. C. et al. Notional all-electric ship systems integration thermal simulation and visualization. **Simulation**, v. 88, n. 9, p. 1116-1128, 2012.

VARGAS, J. V. C. et al. The microalgae derived hydrogen process in compact photobioreactors. **International journal of hydrogen energy**, v. 39, n. 18, p. 9588-9598, 2014.

VARGAS, José Viriato Coelho; ARAKI, L. K. **Cálculo numérico aplicado**. 1ª Ed. São Paulo: Manole, 2016.

WANG, Limin.; ZHANG, L.; LIAN, G. A CFD simulation of 3D air flow and temperature variation in refrigeration cabinet. **Procedia Engineering**.v. 102, p. 1599-1611, 2015.

WOODS, Robert L.; LAWRENCE, Kent L. **Modeling and simulation of dynamic systems**.1ª Ed. University of Michigan: Prentice Hall, 1997.

YANG, P.; CHEN, Z. X. Testing on dynamic behavior of PBGA assembly by considering fixed-modes. **Microelectronics international**, v. 28, n. 2, p. 23-29, 2011.

YANG, S. et al. Volume element model mesh generation strategy and its application in ship thermal analysis. **Advances in engineering software**, v. 90, p. 107-118, 2015.

ANEXO A – INSTALAÇÃO DOS TERMISTORES NO GABINETE**Figura 1:** Vista lateral direita**Figura 3:** Vista interna DG direita**Figura 2:** Vista lateral esquerda**Figura 4:** DG esquerdo superior

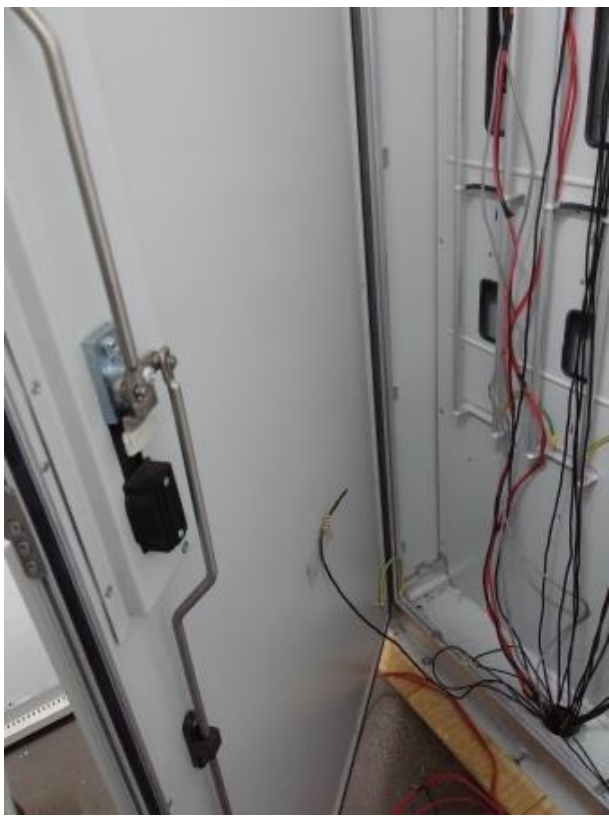


Figura 5: DG esquerdo inferior



Figura 7: Filtro interno direito



Figura 6: Filtro interno esquerdo



Figura 8: Inferior direito



Figura 9: Interior esquerdo



Figura 11: Meio esquerdo



Figura 10: Meio direito



Figura 12: Superior direito



Figura 13: Superior esquerdo

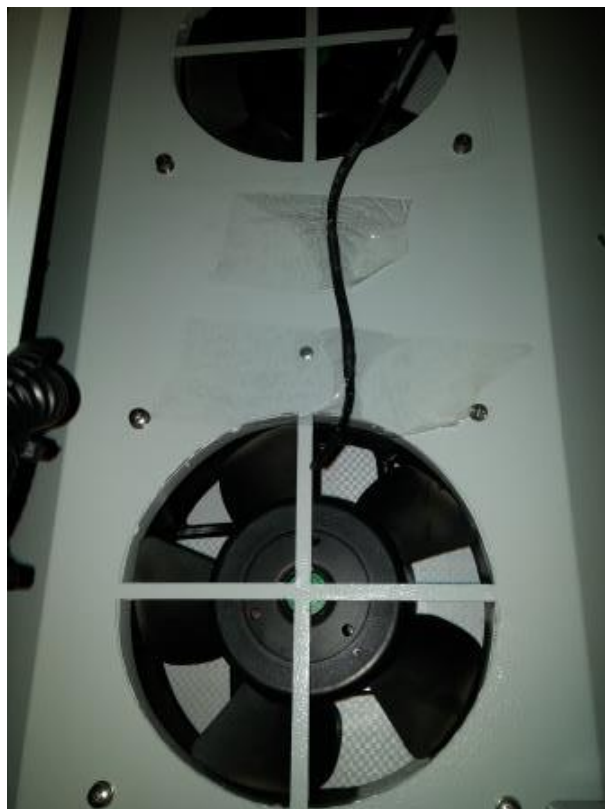


Figura 15: Entrada do ventilador direito



Figura 14: Entrada do ventilador esquerdo

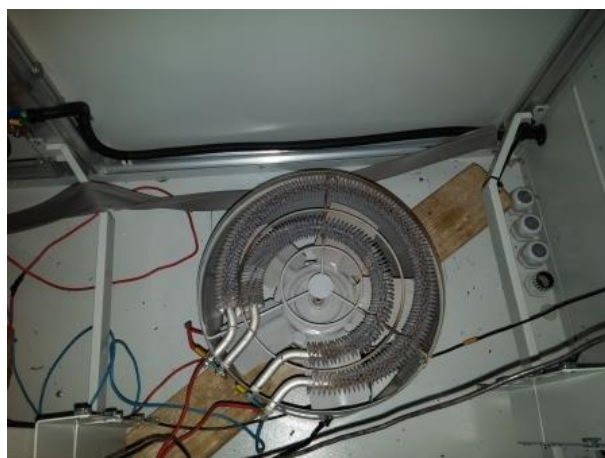


Figura 16: Resistência