



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

THIAGO VIEIRA TAVARES

**OTIMIZAÇÃO DE UM REATOR COM
NÚCLEO DE AR PARA LIMITADORES DE
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DO
TIPO SÉRIE CHAVEADO**

NITERÓI, RJ

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

THIAGO VIEIRA TAVARES

OTIMIZAÇÃO DE UM REATOR COM
NÚCLEO DE AR PARA LIMITADORES DE
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DO
TIPO SÉRIE CHAVEADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:

Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D.Sc.

Co-orientador:

Prof. Felipe Sass, D.Sc.

NITERÓI, RJ

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

T231o Tavares, Thiago Vieira
OTIMIZAÇÃO DE UM REATOR COM NÚCLEO DE AR PARA LIMITADORES DE
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DO TIPO SÉRIE CHAVEADO / Thiago
Vieira Tavares ; Daniel Henrique Nogueira Dias, orientador ;
Felipe Sass, coorientador. Niterói, 2022.
113 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2022.m.13821252758>

1. Limitador de Corrente de Curto-circuito Série Chaveado.
2. Reatores com Núcleo de Ar. 3. Método de Elementos
Finitos. 4. Algoritmo de Otimização PSO. 5. Produção
intelectual. I. Dias, Daniel Henrique Nogueira, orientador.
II. Sass, Felipe, coorientador. III. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

THIAGO VIEIRA TAVARES

OTIMIZAÇÃO DE UM REATOR COM NÚCLEO DE AR PARA LIMITADORES
DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DO TIPO SÉRIE CHAVEADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovado em 22 de fevereiro de 2022.

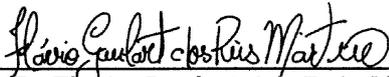
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Felipe Sass - coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Flavio Goulart dos Reis Martins
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Rubens de Andrade Junior
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Niterói
2022

*Dedico esse trabalho primeiramente
aos meus pais, Lúzio e Maria Helena,
em segundo lugar aos meus irmãos e
por último, dedico esse trabalho à Talita,
meu amor.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido o vigor necessário para transpor os desafios durante o mestrado, acredito que sem Ele nada é possível.

Agradeço ao meu pai, Luzio, por ter me inspirado a buscar o meu engrandecimento profissional e por todo o apoio financeiro, custeando grande parte dos meus estudos. Minha mãe, Maria Helena, por todo carinho e amor incondicional. Meus irmãos, Lara, Laissa e Rafael, por todo apoio dado durante a minha vida.

Agradeço à minha namorada, Talita, por todo amor, apoio e incentivo, nunca deixando que as frustrações e desânimo pudessem me derrotar.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense. Agradeço de forma especial aos professores Daniel Henrique Nogueira Dias e Felipe Sass, pela confiança e ensinamentos durante a orientação deste projeto.

*“Somos o que repetidamente fazemos.
A excelência, portanto, não é um feito,
mas um hábito.”
(Aristóteles)*

Resumo

Com o constante crescimento e expansão da rede de transmissão e distribuição de energia elétrica, a intensidade das correntes de curto-circuito estão cada vez maiores. Esse cenário, provavelmente, é o principal responsável pela queima dos equipamentos e pela descontinuidade do serviço. Existem abordagens tradicionais com o propósito de contornar ou, até mesmo, extinguir os efeitos que essas correntes de falta causam no sistema de distribuição. Por exemplo, reconfigurar o sistema e os barramentos, inserir transformadores de alta impedância ou reatores de núcleo de ar são algumas delas. Entretanto, essas abordagens, normalmente, possuem um custo elevado ou geram a ineficiência e a degradação da regulação de tensão. Uma das soluções alternativas para esse problema que tem concentrado a atenção da comunidade acadêmica atualmente é a implementação de Limitadores de Corrente de Curto-Circuitos (LCCs) mais eficientes. Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) com tipos diferentes de topologias de LCCs estão sendo desenvolvidos por diversas instituições e empresas privadas, de modo a se produzir um equipamento que seja confiável e economicamente viável. Assim, este trabalho faz parte de um P&D que tem como principal objetivo a construção de um LCC Série Chaveado (LCC-SC) para instalação em uma rede de distribuição de média tensão. Essa topologia foi escolhida principalmente devido a sua melhor viabilidade econômica em comparação com outras técnicas e configurações. Uma parte fundamental do LCC-SC estudado é o banco trifásico de reatores com núcleo de ar monofásicos, equipamento que atua apenas quando acionado pelos IGBTs, fato que ocorre durante o período de falha e que é responsável por reduzir a corrente prospectiva. Após o término da falha, a chave semicondutora de potência volta a conduzir desconectando novamente esses reatores do circuito de potência, impondo sobre eles um regime de trabalho muito diferente das propostas convencionais. Assim, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de projeto otimizado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) associado à otimização por PSO (*Particle Swarm Optimization*) para reduzir o volume total e o volume de condutor utilizado na construção dos reatores de limitação de corrente, considerando como premissa a sua operação intermitente quando utilizados no LCC-SC. Por conseguinte, objetiva-se reduzir os custos de fabricação. Neste estudo, levou-se em consideração os modelos eletromagnético, térmico e fluidodinâmico computacional (CFD) e na metodologia de otimização mono objetivo aplicou-se duas restrições e cinco variáveis de controle. Considerando as características de curto-circuito do sistema e o tempo de operação do reator durante uma falha, os resultados mostram que a otimização pode reduzir consideravelmente o diâmetro do condutor utilizado e o volume total do equipamento. A metodologia proposta reduziu o volume total do reator utilizado no protótipo laboratorial em aproximadamente 30 vezes.

Palavras-chave: Limitador de Corrente de Curto-circuito Série Chaveado, Reatores com Núcleo de Ar, Método de Elementos Finitos, Algoritmo de Otimização PSO.

Abstract

With the constant growth and expansion of the electricity transmission and distribution network, the intensity of short-circuit currents is increasing. This scenario is probably the main responsible for equipment burnout and service discontinuity. There are traditional approaches with the purpose of circumventing or even extinguishing the effects that these fault currents cause in the distribution system. For example, reconfiguring the system and buses, inserting high impedance transformers or air core reactors are some of them. However, these approaches usually have a high cost or generate inefficiency and degradation of voltage regulation. One of the alternative solutions to this problem that has currently focused the attention of the academic community is the implementation of more efficient Short-Circuit Current Limiters (LCCs). Research and Development (R&D) projects with different types of LCC topologies are being developed by several institutions and private companies, in order to produce equipment that is reliable and economically viable. Thus, this work is part of an R&D that has as main objective the construction of a Switched Series LCC (LCC-SC) for installation in a medium voltage distribution network. This topology was chosen mainly because of its better economic feasibility compared to other techniques and configurations. A fundamental part of the LCC-SC studied is the three-phase bank of single-phase reactors with air core, equipment that only works when activated by the IGBTs, a fact that occurs during the failure period and is responsible for reducing the prospective current. After the end of the fault, the semiconductor power switch starts to conduct again, disconnecting these reactors from the power circuit, imposing on them a work regime very different from the conventional proposals. Thus, the main objective of this work is to develop an optimized design methodology using the Finite Element Method (FEM) associated with PSO optimization (*Particle Swarm Optimization*) to reduce the total volume and the volume of conductor used in the construction of current limiting reactors, considering their intermittent operation as a premise when used in the LCC-SC. Therefore, the objective is to reduce manufacturing costs. In this study, the electromagnetic, thermal and computational fluid dynamic (CFD) models were taken into account and, in the single objective optimization methodology, two restrictions and five control variables were applied. Considering the short-circuit characteristics of the system and the reactor operating time during a fault, the results show that the optimization can considerably reduce the diameter of the conductor used and the total volume of the equipment. The proposed methodology reduced the total volume of the reactor used in the laboratory prototype by approximately 30 times.

Keywords: Switched Series Short Circuit Current Limiter, Air Core Reactors, Finite Element Method, PSO Algorithm.

Lista de Figuras

1.1	Consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos anos.	1
2.1	Circuito RL equivalente.	6
2.2	Corrente de curto-circuito $i(t)$	7
2.3	Comportamento da corrente de curto-circuito, $i(t)$, em um sistema elétrico genérico. (a) Sem limitador. (b) Com limitador. (c) Oscilografia.	8
2.4	Banco trifásico de reatores monofásicos limitadores de curto-circuito apresentado por Kierstead e Stephens.	10
2.5	Configuração genérica de um LCC-SC.	11
2.6	Circuito limitador em (a) regime permanente e (b) curto-circuito.	12
2.7	Reatores secos fabricados pela empresa brasileira ADELCO (a) Núcleo de ar (b) Núcleo ferromagnético.	13
2.8	Reator monofásico seco com núcleo ferromagnético.	15
2.9	Curva de magnetização de diferentes materiais ferromagnéticos.	15
2.10	Reator imerso em um tanque de óleo.	16
2.11	Reator com núcleo de ar do tipo seco.	18
2.12	Exemplo de aplicação do MEF. (a) Elementos finitos característicos. (b) Domínio 3D subdividido.	28
2.13	Esquema de interação das partículas no PSO a cada iteração.	30
3.1	Etapas para o desenvolvimento do reator otimizado.	31
3.2	Gabinete principal do LCC-SC desenvolvido para o laboratório NITEE.	32
3.3	Circuito construído no laboratório para testes no protótipo.	33
3.4	Projeto do módulo limitador de corrente. (a) Desenho técnico. (b) Equipamento fabricado.	33

3.5	Geometria do reator do protótipo laboratorial, em mm.	35
3.6	Processo de homogeneização da bobina do reator.	36
3.7	Modelagem eletromagnética do reator com detalhe nos encapsulamentos.	37
3.8	Condutividade elétrica do alumínio em função da temperatura.	37
3.9	Circuito equivalente.	38
3.11	Modelagem eletromagnética, térmica e fluidodinâmica do reator com detalhe nos encapsulamentos.	40
3.12	Condutividade térmica em função da temperatura. (a) Alumínio. (b) DMD. (c) Ar.	41
3.13	Calor específico em função da temperatura. (a) DMD. (b) Ar.	42
3.14	Parâmetros fluidodinâmicos do ar. (a) Viscosidade. (b) Densidade.	42
3.15	Contorno em azul utilizado para modelar a irradiação térmica no reator.	44
3.16	Reator com o termopar em um dos encapsulamentos.	44
3.17	Bancada com os equipamentos para os ensaios térmicos.	45
3.18	Circuito implementado no <i>software</i> de elementos finitos para realizar a otimização.	46
3.19	Desenho técnico de uma das cruzetas.	48
3.20	Desenho técnico de um dos cilindros.	48
3.21	Vista 3D. (a) Cruzetas. (b) Cilindros.	49
3.22	Circuito para testes de corrente nominal no reator do protótipo.	49
3.23	Correntes de regime permanente $i_s(t)$, $i_c(t)$ e $i_r(t)$	50
3.24	Bancada para testes de corrente no reator do protótipo.	50
4.1	Densidade de fluxo magnético. (a) Vista 2D. (b) Vista 3D.	52
4.2	Distribuição de temperatura durante o processo de aquecimento.	52
4.3	Distribuição de temperatura durante o processo de resfriamento.	53
4.4	Distribuição de temperatura nos encapsulamentos. (a) Medida pelo termovisor. (b) Resultado da simulação.	54

4.5	Distribuição do fluxo de ar ambiente quando a temperatura é máxima, $t = 10$ min.	54
4.6	Distribuição do campo de temperatura e de velocidade do ar ambiente, $t = 10$ min.	55
4.7	(a) Linhas traçadas ao longo do eixo axial. (b) Temperatura ao longo das linhas axiais, $t = 10$ min. (c) Velocidade do ar ao longo das linhas axiais, $t = 10$ min. (d) Velocidade do ar ao longo das linhas axiais depois do encapsulamento mais externo, $t = 10$ min.	56
4.8	Resultados dos ensaios de validação de temperatura no reator do protótipo.	57
4.9	Evolução da função objetivo durante as iterações.	58
4.10	Geometria do reator otimizado, em mm.	59
4.11	Reator otimizado. (a) Peças utilizadas. (b) Reator montado, vista lateral e superior.	60
4.12	Comparação entre o reator do protótipo e o reator otimizado.	60
4.13	Ensaio de medição dos parâmetros elétricos do reator otimizado.	61
4.14	Bancada para testes de corrente e temperatura no reator otimizado.	62
4.15	Temperatura medida quando uma corrente de $4,95 A_{rms}$ é aplicada durante 40 minutos.	62
4.16	Temperatura medida durante o primeiro ensaio de curto-circuito.	63
4.17	Temperatura medida durante o segundo ensaio de curto-circuito.	64
4.18	Temperatura medida durante o terceiro ensaio de curto-circuito.	64

Lista de Tabelas

2.1	Características de cada tipo de condutor.	14
3.1	Parâmetros de placa informados pelo fabricante no tap de 2 mH do reator superior.	34
3.2	Parâmetros geométricos do reator fabricado.	35
3.3	Parâmetros térmicos e fluidodinâmicos.	41
3.4	Parâmetros térmicos e fluidodinâmicos do Ar.	43
3.5	Variáveis de controle.	47
4.1	Parâmetros eletromagnéticos obtidos na simulação × comissionado.	52
4.2	Comparação entre a geometria inicial e a geometria otimizada.	59

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Faltas em Sistemas Elétricos de Potência	6
2.2	Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	7
2.3	Limitadores de Corrente de Curto-Circuito do tipo Série Chaveado	10
2.3.1	Princípio de Funcionamento	11
2.4	Reatores de Limitação	12
2.4.1	Reatores secos com o núcleo ferromagnético	14
2.4.2	Reatores Imersos em Tanque de Óleo	16
2.4.3	Reatores secos com núcleo de ar	17
2.5	Principais Conceitos Físicos, Matemáticos e Computacionais	18
2.5.1	Modelo Eletromagnético	18
2.5.2	Modelo Térmico	20
2.5.3	Modelo CFD	22
2.5.4	Método dos Elementos Finitos	27
2.5.5	Otimização e PSO	28
3	Metodologia	31

3.1	Protótipo Laboratorial de Baixa Tensão	31
3.1.1	Circuito e Gabinete de Comando e Instrumentação	32
3.1.2	Reatores de Limitação	33
3.2	Modelagem do Reator com MEF	34
3.2.1	Modelo Eletromagnético	35
3.2.2	Modelo Térmico e Fluidodinâmico	39
3.3	Otimização com PSO	45
3.4	Construção e Testes	47
4	Resultados	51
4.1	Validação dos modelos de elementos finitos	51
4.2	Otimização e construção	58
4.3	Testes em bancada	59
5	Conclusões	65
5.1	Trabalhos Futuros	66
	Referências	68
	Anexos	75
	Anexo A – Protótipo limitador de corrente C.A.	76
	Anexo B – Protótipo reator com núcleo de ar	91

Capítulo 1

Introdução

A desregulamentação do setor elétrico brasileiro, o aumento da geração distribuída, a conexão de produtores independentes à rede elétrica, a construção das subestações cada vez mais próximo dos centros urbanos e o aumento da demanda por energia no país, Figura 1.1, são fatores que têm influenciado para uma atuação do sistema elétrico próximo dos seus limites de operação e conseqüentemente impactado diretamente na elevação dos níveis de corrente de curto-circuito [1].

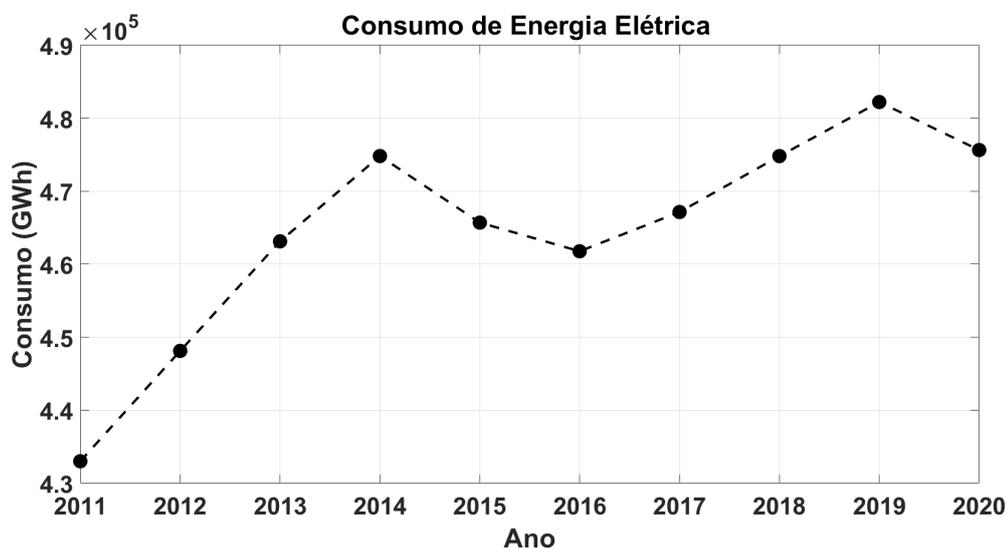


Figura 1.1: Consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos anos.

Fonte: Adaptado de [2].

Em muitos casos, o aumento das correntes de curto-circuito estão superando as projeções realizadas pelas concessionárias. Como consequência, as subestações de energia estão se tornando incapazes de suportar essas correntes. Este cenário tem contribuído para destruição de equipamentos e na frequente interrupção do fornecimento de energia elétrica. Somado a esses fatores, diversas das atuais subestações do sistema foram projetadas há

décadas, tornando-se obsoletas.

Existem também os problemas com relação ao tempo de abertura dos contatos mecânicos e conseqüentemente com a extinção dos arcos voltaicos. Adversidades que têm exigido cada vez mais conhecimento de técnicas para limitação de curto-circuito em todos os níveis de tensão da rede elétrica [3, 4]. Deste modo, equipamentos mais eficientes que consigam atenuar os efeitos das correntes de curto e tenham um menor impacto sobre a confiabilidade do sistema tornam-se cada vez mais atrativos, uma vez que isso resultará em uma melhora na qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica.

Um equipamento que surge como possível solução para esses problemas é o chamado Limitador de Corrente de Curto-circuito (LCC). Além de ser uma solução técnica, ela é economicamente mais atrativa do que a substituição dos equipamentos já instalados por equipamentos mais robustos. O LCC tem como principal objetivo reduzir o nível de corrente de curto-circuito a um valor compatível com os sistemas de proteção das subestações. Entre as várias topologias de LCCs estudadas na literatura, uma solução que se mostra promissora é aquela baseada na eletrônica de potência [5, 6, 7].

Atualmente, as soluções comerciais de LCCs são bastante limitadas, restringindo-se, na maioria das vezes, aos reatores com núcleo de ar instalados em série com a rede, transformadores de alta impedância, LCCs pirotécnicos e resistores de aterramento para transformadores [8, 9, 10]. Essas soluções apresentam limitações operacionais ou, geralmente, causam outros distúrbios no sistema elétrico. Diversas pesquisas têm apresentado soluções e equipamentos ainda não comerciais, dentre esses os Limitadores de Corrente de Curto-Circuito de Estado Sólido (LCC-ES) aparentam ser uma solução promissora para extinguir os possíveis danos causados por essas correntes nas redes e nos equipamentos.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de otimização para o reator de um protótipo de LCC de Estado Sólido de baixa tensão através da realização de diversos ensaios e simulações utilizando-se o Método de Elementos Finitos (MEF) e o algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*). Este protótipo foi construído pela empresa ADELCO em parceria com o Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE), localizado na Universidade Federal Fluminense (UFF) [11].

1.1 Motivação

Devido aos avanços na tecnologia dos dispositivos semicondutores de alta potência, LCCs baseado em chaves de estado sólido têm atraído a atenção de diversos pesquisadores nos últimos anos. Por se tratar de uma solução rápida, confiável e independente de mudanças na estrutura das subestações, necessitando apenas do espaço necessário para a alocação do novo equipamento. Vários estudos já estão sendo realizados baseando-se nessa tecnologia [12, 13, 14]. Desta forma, observa-se uma grande capacidade deste tipo de tecnologia LCC se tornar um equipamento produzido em escala comercial.

Neste contexto, é importante destacar que este trabalho faz parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que visa a construção de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito de Estado Sólido de média tensão. Esse equipamento será instalado em uma subestação de propriedade da concessionária Light, empresa brasileira de distribuição de energia elétrica. Durante o desenvolvimento da pesquisa, buscou-se maneiras de reduzir o custo de fabricação, portanto desenvolver métodos que ajudem no processo de otimização dos componentes deste equipamento são de grande interesse acadêmico e industrial.

1.2 Objetivos

Problemas com as correntes de curto-circuitos são efeitos indesejáveis na rede de distribuição de energia elétrica e podem causar danos irreversíveis aos equipamentos das subestações. O LCC de Estado Sólido possui a capacidade de solucionar tecnicamente e economicamente os problemas causados por esse cenário. Essa topologia, geralmente, possui um banco de reatores responsável por reduzir os valores das correntes de curto-circuito, eles ficam posicionados em paralelo com as chaves semicondutoras. Quando ocorre uma falta na rede, uma corrente violenta é gerada e instantaneamente é desviada para o banco de reatores. Quando a falta é extinta, a corrente retorna a circular nas chaves semicondutoras. Esse processo altera o regime de trabalho dos reatores que passam a operar de maneira intermitente, completamente diferente dos reatores de limitação de curto-circuitos convencionais construídos para operarem conectados em série com a rede [15, 16, 17, 8].

Deste modo, este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo para otimizar a geometria desse banco de reatores em função do seu novo regime de trabalho, sendo necessário realizar as seguintes etapas:

- Avaliar os aspectos técnicos de um protótipo LCC de estado sólido fabricado para atuar em baixa tensão, 220 V;
- Conceber e validar um modelo baseado no Método de Elementos Finitos com o objetivo de considerar os efeitos eletromagnéticos, térmicos e fluidodinâmicos que incidem sobre os reatores;
- Realizar uma otimização no volume dos reatores baseando-se no seu funcionamento intermitente;
- Construir e ensaiar na bancada a solução encontrada.

1.3 Estrutura

O presente capítulo apresenta uma breve introdução da problemática estudada, assim como o objetivo e estrutura desta dissertação. No Capítulo 2 são apresentados os principais fundamentos teóricos com destaque para os Limitadores de Curto-Circuito Série Chaveado, os reatores secos com núcleo de ar e os processos físicos que permeiam os reatores quando eles operam. No Capítulo 3 é apresentado e explicado como os conceitos matemáticos, físicos e computacionais foram utilizados nesse estudo e, também, os ensaios realizados na bancada. Já no capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões pertinentes. Por fim, o Capítulo capítulo 5 conclui a dissertação, revisitando os principais pontos discutidos no trabalho, destacando as principais contribuições e estabelecendo os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Devido ao constante crescimento da demanda de energia elétrica, a corrente elétrica nos sistemas de transmissão e distribuição tem aumentado consideravelmente em todo o país. O crescimento das correntes nominais do sistema influenciam diretamente no aumento da intensidade das correntes de falta nas redes de transmissão e distribuição. Essas correntes, em muitos casos, excedem a capacidade dos equipamentos de proteção de interromper um curto-circuito com segurança e confiabilidade. Além de danificarem os equipamentos, também colocam em risco a segurança dos trabalhadores das concessionárias. Geralmente, as concessionárias atualizam seus disjuntores e equipamentos ou reconfiguram seu sistema para reduzir o impacto das correntes de falta. Estas soluções são caras e frequentemente reduzem a confiabilidade do sistema [18].

A tecnologia do Limitador de Corrente de Curto-Circuito é reconhecida na comunidade científica como uma solução potencialmente viável para limitar as correntes de faltas à capacidade nominal dos equipamentos de proteção, e com isso suprir à crescente demanda por eletricidade sem que seja necessário reconfigurar a rede ou realizar a troca de equipamentos, visto que essas soluções necessitariam de grandes investimentos [15].

Dentre as inúmeras falhas que ocorrem em sistemas de distribuição de energia, a falha de curto-circuito é, provavelmente, a mais destrutiva. Nos casos mais brandos, o circuito é interrompido pelos equipamentos de proteção, resultando em perda de serviço. Já nas falhas graves, a grande quantidade de energia da corrente fluindo através dos condutores eleva a temperatura destruindo o isolamento, o que pode causar graves acidentes, como, também, as intensas forças eletromagnéticas impostas nos condutores e nas estruturas durante o período da falta [19].

2.1 Faltas em Sistemas Elétricos de Potência

Um curto-circuito ocorre quando uma redução abrupta na impedância é imposta ao sistema de energia elétrica. Neste momento, acontece a passagem de uma corrente com valores muito acima da nominal. Quando a falta ocorre longe dos geradores e a carga é majoritariamente indutiva, a forma característica das correntes de falta pode ser comparada à corrente de um circuito RL , Figura 2.1, em que, $v_S(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha)$ V e $t = 0$ é o tempo em que a falta ocorre. O comportamento da corrente do sistema em função do tempo é facilmente obtido através da solução da equação diferencial, Equação 2.1.

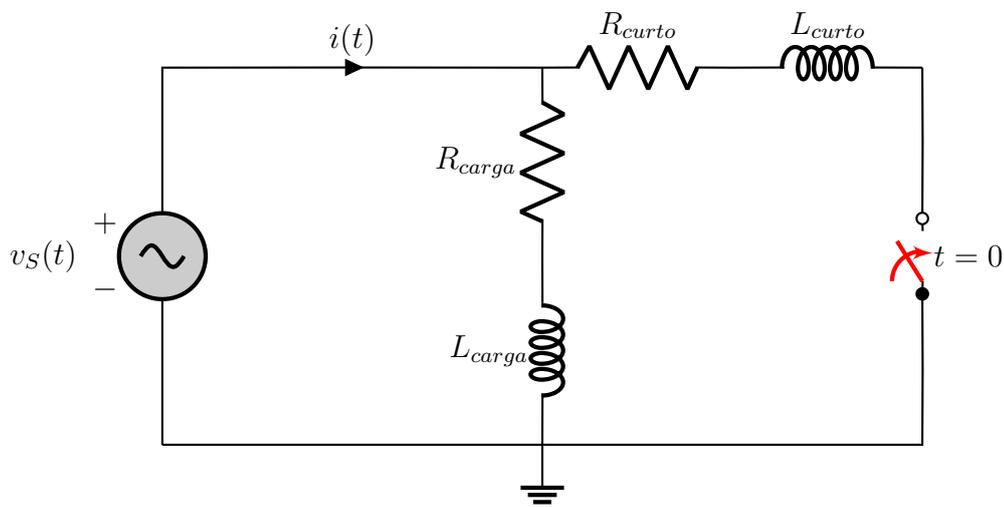


Figura 2.1: Circuito RL equivalente.

$$V \text{sen}(\omega t + \alpha) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

onde:

- V é a amplitude da tensão;
- α é o argumento da tensão;
- ω é a velocidade angular;
- R é a resistência total;
- L é a indutância total.

Sabe-se que o módulo e o argumento da impedância total do sistema são iguais à $|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ e $\text{arg}(\mathbf{Z}) = \theta = \text{arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$, respectivamente. Logo, tem-se que [20]:

$$i(t) = \frac{V}{|Z|} [\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta)e^{-\frac{R}{L}t}] \quad (2.2)$$

Analisando a Equação (2.2), nota-se que ela é composta pela soma de dois termos, o primeiro que oscila com a mesma frequência da fonte e o segundo, um termo contínuo que decai com o tempo. O termo exponencial é chamado de componente de corrente contínua ou componente CC e a sua presença na corrente de falta caracteriza o período transitório, conforme indicado na Figura 2.2.

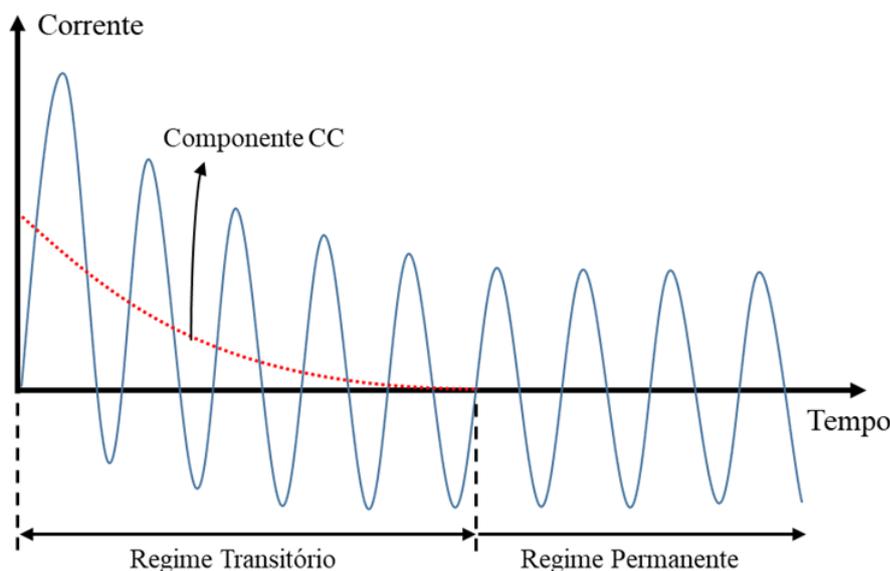


Figura 2.2: Corrente de curto-circuito $i(t)$.

2.2 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Os LCCs são dispositivos, normalmente, instalados em série com a rede e possuem como principal objetivo a redução da corrente de curto para níveis desejáveis, auxiliando os equipamentos de proteção, previamente instalados nas subestações, e tornando todo o sistema mais seguro. Em condições normais de operação, o LCC deve possuir uma impedância desprezível para que não existam perdas no equipamento. Quando ocorre uma falha, a impedância do LCC precisa aumentar instantaneamente para atenuar a corrente. A Figura 2.3 demonstra a diferença entre dois sistemas genéricos, um com o LCC e outro sem.

Quando o sistema opera sem a presença do LCC, Figura 2.3 (a), apresenta elevados níveis de corrente de curto-circuito. O valor da corrente medida sem limitador pode ser visualizado na Figura 2.3 (c) como a curva em vermelho pontilhada. Esta corrente é

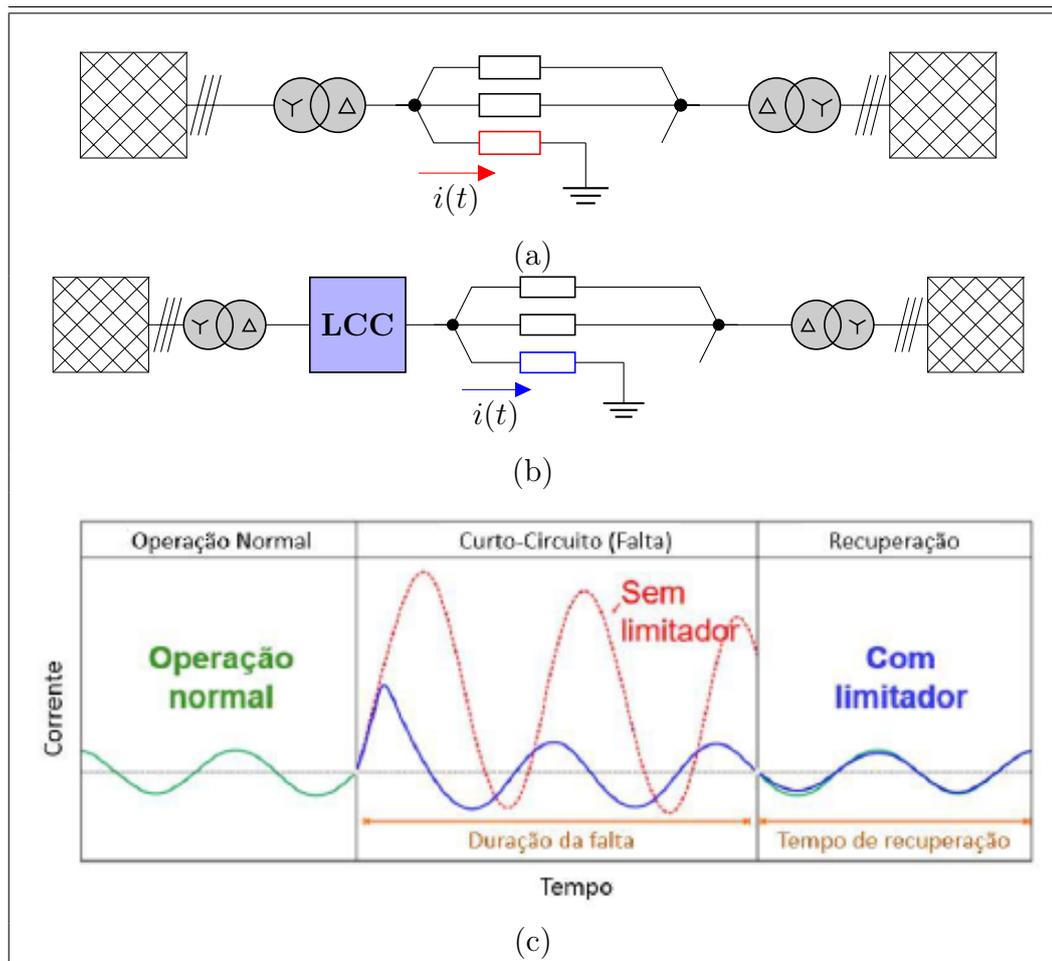


Figura 2.3: Comportamento da corrente de curto-circuito, $i(t)$, em um sistema elétrico genérico. (a) Sem limitador. (b) Com limitador. (c) Oscilografia.

Fonte: Adaptado de [21].

intitulada corrente prospectiva. Já quando o sistema possui a presença do LCC, uma impedância é introduzida durante a falta, Figura 2.3 (b), e a corrente é atenuada. Esta corrente é intitulada corrente limitada, curva em azul na Figura 2.3 (c).

Para que um Limitador seja bem sucedido comercialmente, ele precisa apresentar as seguintes características [22]:

1. Baixa queda de tensão em regime permanente;
2. Suportar os níveis de tensão e corrente do sistema;
3. Pequena ou nenhuma distorção na energia a jusante;
4. Campo eletromagnético residual desprezível.

Em caso de curto-circuito, deve:

1. Limitar a corrente de falta;
2. Tolerar os esforços mecânicos;
3. Suportar o aumento da temperatura;
4. Tempo de atuação na ordem de milissegundos;
5. Suportar uma sequência de falhas recorrentes;
6. Não interferir nos esquemas de proteção existentes.

Para se tornar um produto, é desejado que possua:

1. Tolerância a condições climáticas adversas;
2. Isolamento para descarga atmosférica;
3. Baixo custo de instalação, operação e manutenção.

Desde o início do século XX, já se empregava reatores com o objetivo de limitar as correntes de curto-circuito. Kierstead e Stephens em 1924 apresentaram as características principais e essenciais no processo de projeto, instalação e operação de reatores limitadores de corrente. A Figura 2.4 mostra um dos equipamentos estudados por eles [16]. Na atualidade, existem, também, os equipamentos convencionais utilizados para o propósito de limitação de corrente, tal como os dispositivos pirotécnicos [23] e os reatores com núcleo de ar conectados ininterruptamente ao sistema elétrico [24, 25, 26, 27].

De modo geral, os LCCs são classificados pelo seu princípio de funcionamento e pelos principais componentes tecnológicos que os compõem. Na literatura, existem os LCCs baseados na supercondutividade, eles são subdivididos nos limitadores resistivos [28, 29, 30], indutivos [31, 32, 33] e os com núcleo saturado [34, 35, 36].

Apesar de muitas topologias terem notoriedade atualmente, aquelas baseadas na eletrônica de potência estão se mostrando mais promissoras [37, 38, 39]. Isto, provavelmente, deve-se ao fato das chaves semicondutoras serem uma tecnologia amplamente conhecida e difundida comercialmente. Os LCCs ressonantes beneficiam-se das propriedades dos componentes passivos armazenadores de energia, capacitores e indutores. Na frequência de ressonância a impedância capacitiva é igual a impedância indutiva tornando a impedância equivalente total do equipamento, vista pela fonte, nula. Assim, esses equipamentos são projetados para não alterarem a impedância da rede na frequência nominal do sistema,

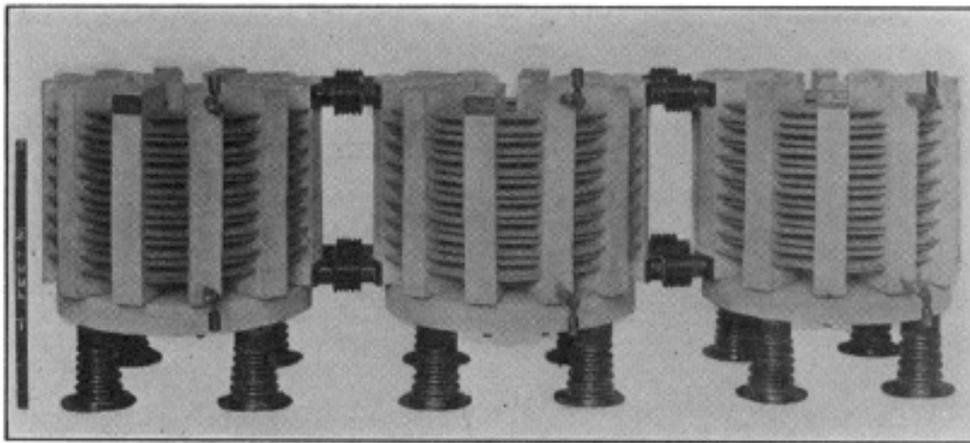


Figura 2.4: Banco trifásico de reatores monofásicos limitadores de curto-circuito apresentado por Kierstead e Stephens.

Fonte: adaptado de [16].

porém, quando ocorre uma falha, uma chave semicondutora de potência é responsável por fazer a transição do equipamento da configuração ressonante para a configuração limitadora [5].

Existem diversas topologias de Limitadores de corrente de curto-circuito e a escolha daquela a ser instalada em um determinado sistema deve ser baseado em critérios técnicos e econômicos do projeto.

2.3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito do tipo Série Chaveado

Os Limitadores de Corrente de Curto-Circuito do tipo Série Chaveado (LCC-SC) possuem em sua composição genérica um arranjo bidirecional de chaves semicondutoras controladas (*Solid-State Switch*) e um sistema *shunt*, Figura 2.5. A chave bidirecional pode ser implementada utilizando-se um dispositivo semicondutor, por exemplo os SCRs, os GTOs, os ETOs, os IGBTs e os IGCTs. Já o sistema *shunt* é composto pela combinação de vários ramais em paralelo. Os componentes utilizados no sistema *shunt* geralmente são o ZnO , resistor variável para a proteção de sobretensão, o *Snubber*, para proteção contra variações instantâneas de tensões sobre a chave no momento em que ela para de conduzir, a chave eletromecânica de *bypass*, S_{bp} , acionada quando necessário realizar alguma manutenção no equipamento, por fim, uma impedância, Z_f , responsável pela limitação da corrente de falha. Portanto, a complexidade do sistema *shunt* será direcionada pela característica do projeto e da topologia empregada.

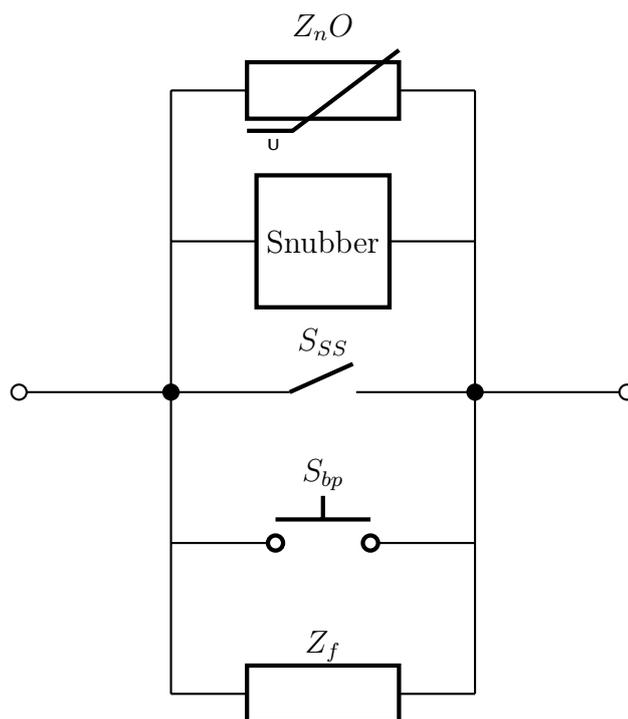


Figura 2.5: Configuração genérica de um LCC-SC.

2.3.1 Princípio de Funcionamento

Um importante componente do limitador é a impedância Z_f , que pode ser construída a partir de diversos tipos de componentes resistivos e indutivos. No momento do curto, a corrente deve fluir por ela sendo atenuada a níveis aceitáveis pelos equipamentos de proteção da subestação. Devido à facilidade na sua construção e a rápida dissipação térmica, os reatores geralmente são os componentes mais utilizados no ramal de limitação, uma vez que impedâncias majoritariamente resistivas são mais caras e aquecem mais rapidamente. O ramal para proteção de sobretensão, ZnO , é normalmente implementado com varistores ou para-raios de alta tensão. Quando a chave semicondutora pára de conduzir, esse ramal cria um caminho alternativo para a corrente, absorvendo parte da energia armazenada na rede e limitando a tensão entre os equipamentos.

A Figura 2.6 representa parte do circuito de um LCC-SC. O sistema é representado por uma fonte de tensão, uma resistência de carga e uma resistência de curto, que pode ser inserida ou retirada do circuito por meio de uma chave ideal. No regime permanente, Figura 2.6 (a), as chaves semicondutoras estão em condução, fazendo com que o LCC não acrescente impedância ao sistema. Com a ocorrência de um curto-circuito, Figura 2.6 (b), as chaves deixam de conduzir e o reator é conectado em série com a rede, aumentando a impedância total e reduzindo a corrente de falta. A Figura 2.6 mostra apenas um tipo de

arranjo para as chaves semicondutoras, mas outros arranjos também podem ser usados [7].

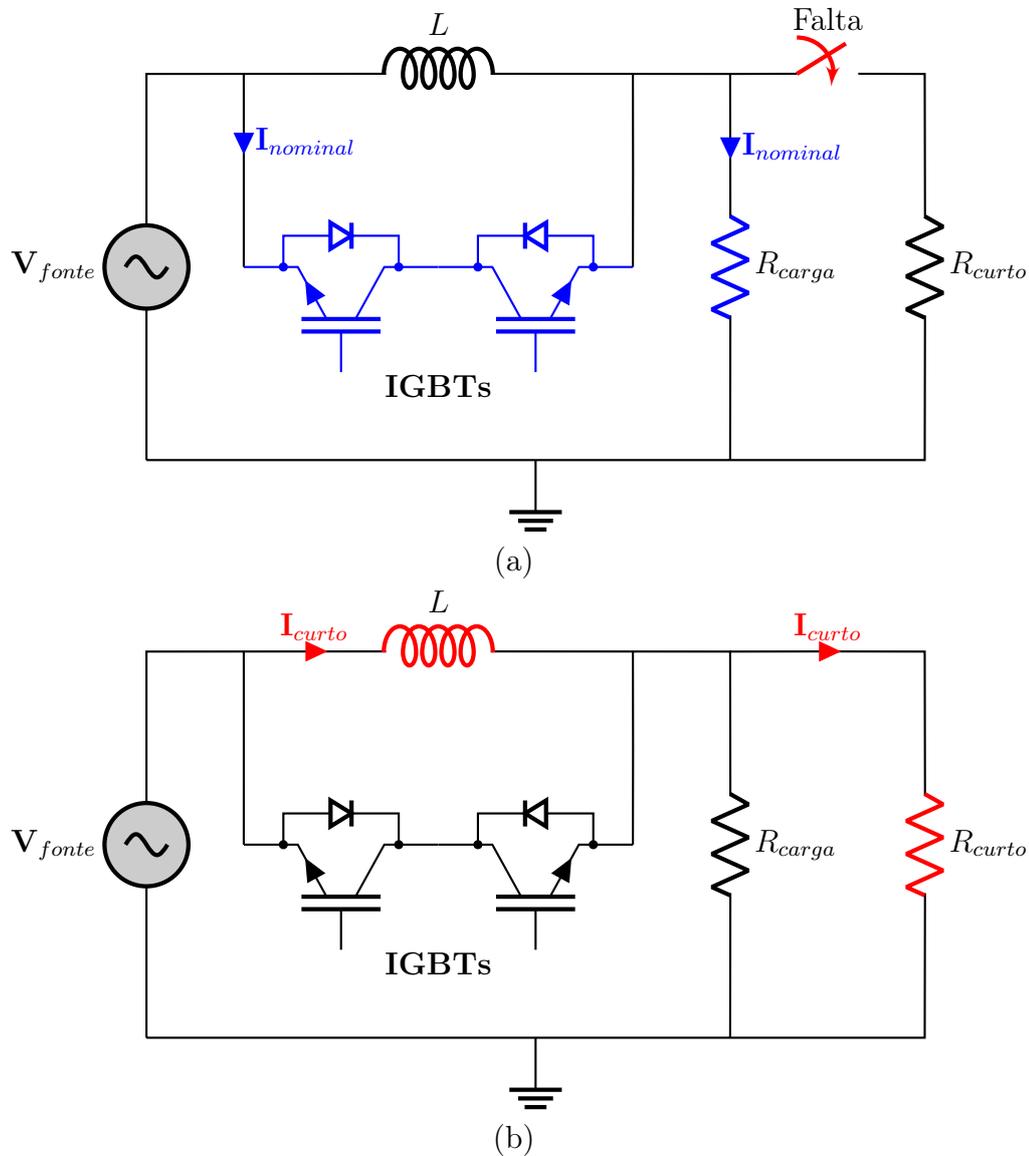


Figura 2.6: Circuito limitador em (a) regime permanente e (b) curto-circuito.

A topologia do limitador enfatizado neste trabalho, Figura 2.6, possui um reator limitador conectado em paralelo com uma chave semicondutora. Na próxima seção, serão apresentados os principais tipos de reatores comerciais disponíveis no mercado.

2.4 Reatores de Limitação

Os reatores são elementos passivos que possuem como principal característica uma oposição a variações na corrente elétrica. Eles podem ser empregados em diversas aplica-

ções dentro do processo de distribuição de energia elétrica, por exemplo, na compensação de potência reativa, na filtragem de harmônicos, na limitação de correntes de curto-circuito etc. Com isso, os reatores possuem um papel fundamental na obtenção de uma maior confiabilidade nos sistemas elétricos de potência. Alguns aspectos construtivos devem ser levados em consideração na fabricação desses reatores:

1. Reatores com núcleo de ar ou com núcleo ferromagnético;
2. Reatores com refrigeração à ar ou à óleo;
3. Reatores com enrolamento de alumínio ou de cobre.

A ausência do material ferromagnético nos reatores com núcleo de ar, Figura 2.7 (a), os tornam dispositivos completamente lineares. Entretanto, quando um material ferromagnético é empregado, ocorre um aumento expressivo da indutância o que possibilita uma redução volumétrica significativa do equipamento, Figura 2.7 (b). O material ferromagnético, também introduz uma não linearidade ao dispositivo fazendo com que a indutância seja considerada linear apenas em uma pequena faixa do módulo da corrente.

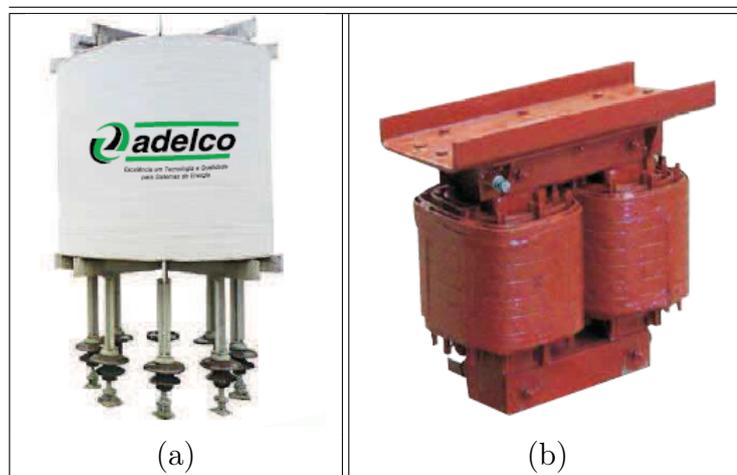


Figura 2.7: Reatores secos fabricados pela empresa brasileira ADELCO (a) Núcleo de ar (b) Núcleo ferromagnético.

Fonte: adaptado de [40].

A escolha do condutor exerce um papel importante no projeto. Condutores de cobre possuem uma menor resistência a passagem da corrente elétrica e possuem uma maior maleabilidade, quando comparados aos condutores de alumínio. Entretanto, os condutores de cobre são mais caros e mais pesados que os condutores de alumínio, conforme apresentado na Tabela 2.1 [41].

Tabela 2.1: Características de cada tipo de condutor.

Propriedade	Cobre	Alumínio
Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot mm^2/km$)	17,241	28,264
Densidade (g/cm^3)	8,89	2,703
Preço da Tonelada (US\$)	5.800,00	1.800,00

Um equipamento mais sofisticado é o reator imerso em óleo. Eles podem ser fabricados com núcleo de ar ou com núcleo ferromagnético e toda a parte ativa do dispositivo deve estar imersa em um tanque de óleo. Eles possuem vantagens como a possibilidade de instalação ao ar livre ou em ambientes caracterizados por poluição de alto nível, distâncias menores de segurança, graças ao fato do tanque ser aterrado, blindagem do campo magnético dentro do próprio tanque, o que minimiza os campos magnéticos dispersos e possibilita a instalação ao lado de equipamentos metálicos, otimizando o uso do espaço. Quando fabricados com óleo natural ou ésteres sintéticos, causam um impacto mínimo ao meio ambiente.

Com relação ao arrefecimento, nos reatores secos ele é realizado pelo ar ambiente e pode ser classificado em passivo ou ativo, quando se utiliza ventiladores para melhorar o processo de convecção. Geralmente, seu encapsulamento é construído de maneira a possibilitar que o fluxo de ar penetre com maior facilidade em seu interior. Já os reatores imersos em óleo utilizam um material condutor térmico para otimizar o processo de troca de calor e, conseqüentemente, acelerar o resfriamento. Assim, a escolha do tipo de arrefecimento incide diretamente no desempenho e no custo do equipamento. As próximas seções detalham os principais tipos reatores utilizados no ramal de limitação.

2.4.1 Reatores secos com o núcleo ferromagnético

O núcleo dos reatores ferromagnéticos é feito de um material de alta permeabilidade que atua como um excelente condutor para o fluxo magnético, como ilustrado na Figura 2.8 [42]. O valor de permeabilidade magnética do núcleo define a sua capacidade de conduzir e concentrar o fluxo magnético e, conseqüentemente, aumentar indutância desses reatores. Entretanto, mesmo com a adição do material ferromagnético, uma pequena fração do fluxo ainda assim se dispersa do núcleo indo para o ar circundante, resultando em perdas. Geralmente, a permeabilidade de um núcleo ferromagnético é de 2000 a 6000 vezes a do ar [43].

Com o uso do material ferromagnético no núcleo, a relação entre o fluxo enlaçado e a

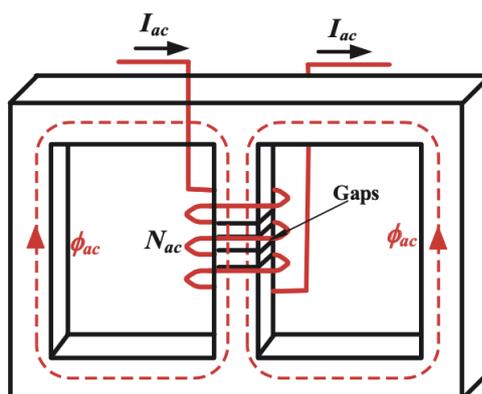


Figura 2.8: Reator monofásico seco com núcleo ferromagnético.

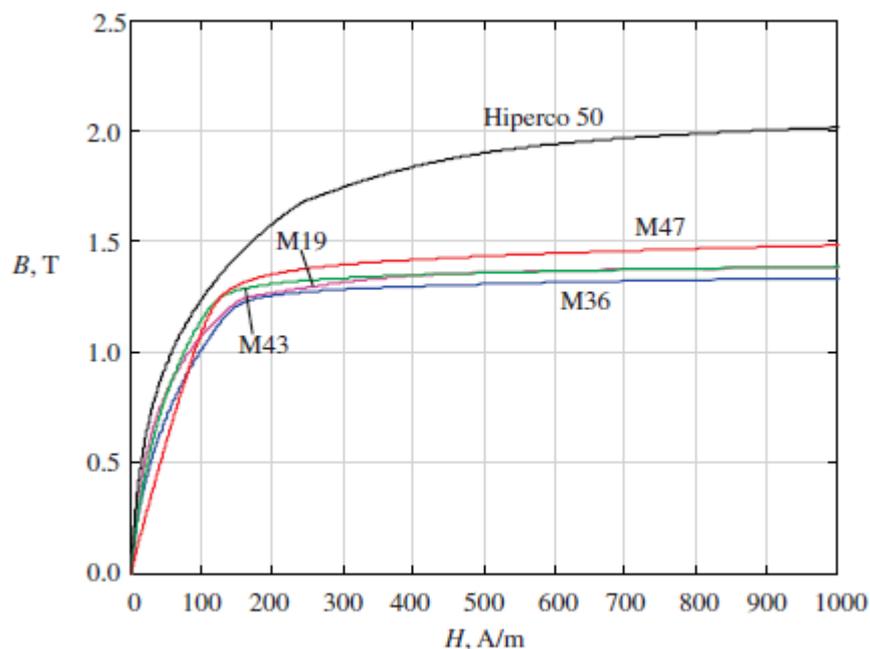


Figura 2.9: Curva de magnetização de diferentes materiais ferromagnéticos.

corrente no enrolamento passa a ser não linear. A variação da densidade de fluxo (\mathbf{B}) com o aumento da intensidade de campo (\mathbf{H}) é aproximadamente linear no início da curva. Entretanto, após a saturação, um aumento na intensidade de campo pouco influencia na densidade de fluxo magnético. Essa característica torna a curva de magnetização dos materiais ferromagnéticos não linear. A Figura 2.9 mostra a curva de magnetização para diferentes materiais ferromagnéticos [44].

A principal vantagem de se utilizar um material ferromagnético no núcleo é que pode-se conseguir uma densidade de fluxo maior, quando comparado com o reator com núcleo de ar dada uma mesma força magnetomotriz empregada. Entretanto, pelo fato de a permeabilidade magnética variar com a intensidade do fluxo magnético, se o fluxo resultante

passar de um determinado valor, o núcleo irá saturar. Essa situação obriga esse tipo de reator a operar na região não saturada da curva de magnetização. Uma prática comum para melhorar a linearidade da curva de magnetização desses reatores é colocar espaços livres de ar no núcleo ferromagnético (*gaps*) [45].

Com a adição de entreferros, a permeabilidade efetiva do núcleo e, conseqüentemente, a indutância do dispositivo são reduzidas. Mas a presença da relutância dominante no circuito magnético melhora a faixa utilizável de operação nos sistemas de potência. As lacunas de ar desempenham, também, um papel vital em tornar o fluxo menos sensível às mudanças ambientais, como temperatura. Deste modo, o comprimento desses *gaps* precisam ser calculados adequadamente para que haja um equilíbrio entre as restrições impostas pelo projeto e o valor desejado de indutância. É importante, também, levar em consideração no projeto as perdas por histerese e por correntes parasitas no material ferromagnético.

2.4.2 Reatores Imersos em Tanque de Óleo

Notadamente, imergir o reator em óleo torna o projeto mais complexo. O processo de construção desses equipamentos assemelha-se com o processo de construção dos transformadores de potência, sendo constituído por um tanque, enrolamento, núcleo, buchas, tanque de expansão do óleo e sistema de refrigeração, Figura 2.10.



Figura 2.10: Reator imerso em um tanque de óleo.
Fonte: adaptado de [46].

No tanque, compartimento de aço preenchido com óleo isolante, a parte ativa é imersa. O óleo isolante tem a função de circular através dos enrolamentos e do núcleo melhorando a remoção do calor. As buchas são dispositivos de porcelana que têm a finalidade de garantir

que a distância elétrica mínima permitida entre o terminal e o tanque seja respeitada. O tanque de expansão permite a dilatação do volume de óleo, variação que ocorre devido as mudanças nas temperaturas dos enrolamentos e do núcleo. Já os radiadores são instalados na parte externa do tanque e realizam a circulação do óleo através das aletas que, em contato com o ar ambiente, diminuem a temperatura do óleo [47].

Apesar dessa tecnologia possuir algumas vantagens, a complexidade, o elevado custo de fabricação e de manutenção, as preocupações ambientais, os riscos de incêndio e o peso elevado tornam essa solução menos atrativa nos projetos de limitadores de corrente [8].

2.4.3 Reatores secos com núcleo de ar

A principal desvantagem dos reatores secos com núcleo de ar em relação aos reatores ferromagnéticos e aos reatores imersos em óleo é o forte campo magnético disperso gerado em seus arredores, devido à falta de um circuito ferromagnético fechado. Efeito que deve ser levado em consideração quando esses equipamentos são instalados nas subestações, uma vez que pode induzir correntes parasitas em condutores e equipamentos próximos. Logo, se não projetados e instalados corretamente, esses reatores tornam-se uma fonte indesejável de poluição eletromagnética na subestação [48]. Para reduzir esta interferência pode-se adotar estratégias como: elevar o reator, blindá-lo e desenvolver um sistema de aterramento seguro [49].

O reator com núcleo de ar do tipo seco consiste em um ou mais enrolamentos cilíndricos concêntricos conectados em paralelo ou em série e fixados por suportes transversais (Cruzetas) localizados nas partes superior e inferior, Figura 2.11. Os enrolamentos dos encapsulamentos podem ser bobinados de diferentes maneiras e com diferentes tipos de condutores. Geralmente, cada enrolamento é separado radialmente um do outro por varretas compostas de resina de poliéster de fibra de vidro, formando assim os dutos de ar necessários para a circulação do ar no equipamento [50]. Nos reatores com refrigeração passiva, o resfriamento acontece por convecção natural do ar, que entra pelas extremidades inferiores e sai pelas extremidades superiores [51, 52].

A principal vantagem desses reatores, certamente, é o fato de possuírem uma característica linear entre a corrente e tensão [53]. Acrescentado a isso, são ecologicamente limpos, são de fácil instalação, manutenção e dispensam a infraestrutura demandada por equipamentos mais complexos, como os imersos em tanque de óleo [17]. Além, de serem equipamentos de fabricação mais simples e, conseqüentemente, mais baratos. Levando em consideração a topologia do limitador LCC-SC e as características de cada tipo de reator,

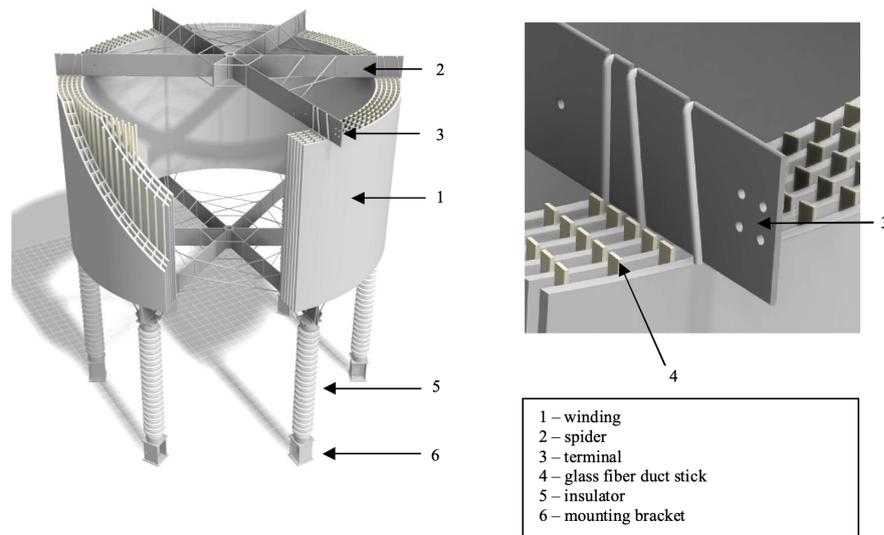


Figura 2.11: Reator com núcleo de ar do tipo seco.
Fonte: adaptado de [50].

o reator seco com núcleo de ar geralmente é utilizado no ramal de limitação.

2.5 Principais Conceitos Físicos, Matemáticos e Computacionais

O desenvolvimento de métodos analíticos ou computacionais que calculem e descrevam os fenômenos físicos do equipamento são de extrema importância. Esta seção introduz os principais conceitos eletromagnéticos, térmicos, fluidodinâmicos (CFD) e computacionais utilizados na modelagem e na otimização do reator do ramal de limitação. Esses princípios físicos foram implementados utilizando-se a abordagem do Método dos Elementos Finitos que apresenta três tipos de soluções possíveis: estacionária, no domínio da frequência e no domínio do tempo.

A seguir, serão descritas as principais equações que regem os estudos eletromagnético, térmico e fluidodinâmico usados na modelagem e validação, e os métodos de elementos finitos e PSO usados na modelagem e na otimização, respectivamente.

2.5.1 Modelo Eletromagnético

O modelo eletromagnético calcula a resistência e a indutância do reator de núcleo de ar. Seus valores afetam diretamente a capacidade de limitação de corrente de falta do LCC-SC, portanto, essas variáveis precisam ser calculadas adequadamente. Sabe-se que o reator é predominantemente indutivo e a parcela resistiva pode até ser desprezada em

alguns casos. Através dos cálculos eletromagnéticos é possível, por exemplo, determinar a corrente induzida nas barras de alumínio que sustentam o reator e nos terminais de conexão. Assim, o projeto eletromagnético busca calcular, também, os campos magnéticos e elétricos para que os efeitos destes campos sobre as partes que compõe o equipamento possam ser avaliados, se necessário.

O potencial vetor magnético, \mathbf{A} , é calculado utilizando-se a Equação 2.3, em que a entrada do sistema é a densidade de corrente, \mathbf{J} , e μ é a permeabilidade magnética do meio.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}. \quad (2.3)$$

O potencial vetor magnético é usado para calcular a densidade de fluxo magnético, \mathbf{B} , e o campo elétrico, \mathbf{E} , Equações 2.4 e 2.5, respectivamente.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}; \quad (2.4)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (2.5)$$

Através da lei de ohm, tem-se a relação entre o campo elétrico e a densidade de corrente, Equação 2.6, em que σ é a condutividade do meio.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2.6)$$

A relação entre a densidade de fluxo magnético e a intensidade de campo magnético, \mathbf{H} , é dada por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (2.7)$$

Além disso, a tensão total, V , nos terminais do reator é igual à integração do campo elétrico ao longo do caminho condutor, c .

$$V = - \int_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}, \quad (2.8)$$

Os principais objetos de estudo do modelo eletromagnético são: as perdas elétricas,

responsáveis pelo aquecimento do equipamento, a geometria da bobina, responsável pela indutância do reator e o fluxo magnético produzido. A perda elétrica nos elementos é calculada através da equação 2.9, onde P_{ele} representa as perdas no material condutor, em watt. Os fluxos concatenados pelas bobinas do reator podem ser calculados pelas equações 2.10, 2.11 e 2.12 [54]. Por fim, o campo magnético do reator é calculado através da equação 2.4. Com todas as variáveis de interesse calculadas, pode-se, então, determinar as fontes de aquecimento do material. Estas fontes servem como dados de entrada para o modelo térmico.

$$P_{ele} = \int \int \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dV; \quad (2.9)$$

$$\Psi_{ii} = L_{ii}i_i; \quad (2.10)$$

$$\Psi_{ij} = L_{ij}i_j; \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \vdots \\ \Psi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & \dots & L_{an} \\ L_{ba} & L_{bb} & \dots & L_{bn} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ L_{na} & L_{nb} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

onde:

- Ψ_{ii} é o fluxo concatenado pelo enrolamento i em função de sua própria corrente;
- Ψ_{ij} é o fluxo concatenado pelo enrolamento i em função da corrente no enrolamento j do reator;
- L_{ii} é a indutância própria da bobina i do reator;
- L_{ij} é a indutância mútua entre as bobinas i e j do reator.

2.5.2 Modelo Térmico

Em um projeto de um reator de média tensão uma das variáveis mais importante é a temperatura dos encapsulamentos que pode afetar a resistência do material condutor, por exemplo [53, 55]. A temperatura no entorno do reator também pode afetar as propriedades

do ar circundante e com isso influenciar o processo de resfriamento dos encapsulamentos. Sendo assim, uma simulação térmica que considere os efeitos da temperatura sobre os condutores e o meio externo é fundamental para um modelo computacional adequado do reator com núcleo de ar.

A equação 2.13 descreve a propagação do calor em meios sólidos. Após a determinação da propagação da temperatura em meios sólidos, é necessário considerar a propagação de calor através do processo de convecção. Se o coeficiente de transferência de calor, h , entre um meio sólido condutor de calor e o meio fluido é conhecido, essa transferência de calor pode ser calculada através da equação simplificada 2.14 [53].

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q; \quad (2.13)$$

$$q_n = h(T_{amb} - T). \quad (2.14)$$

Em que,

- k é a condutividade térmica do material ($W/(m \cdot K)$);
- T e T_{amb} são as temperaturas no ponto calculado e ambiente, respectivamente (K);
- C_p é o calor específico ($J/(kg \cdot K)$);
- ρ é a densidade do meio (kg/m^3);
- Q é a densidade volumétrica da potência dissipada (W/m^3);
- q_n é o fluxo de calor na direção normal à superfície que divide os dois meio (W/m^2);
- h é o coeficiente de transferência de calor ($W/(m^2 \cdot K)$).

A densidade volumétrica de potência dissipada, Q , é a variável que acopla o modelo térmico ao modelo eletromagnético. Ela é gerada a partir da potência dissipada no material condutor através das perdas elétricas, efeito que aumenta a temperatura nos encapsulamentos do reator. Por fim, também cabe destacar a importância de se considerar no modelo a temperatura ambiente da subestação em que o equipamento será instalado, T_{amb} .

O processo de irradiação também precisa ser levado em consideração:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_n = \varepsilon \Phi (T_{amb}^4 - T^4), \quad (2.15)$$

em que,

- $\Phi = 5,67 \times 10^{-8}$ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$);
- ε é o coeficiente de emissividade da superfície.

2.5.3 Modelo CFD

Dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*) pode ser descrita de forma generalizada como a simulação numérica de todos aqueles processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam o transporte de momento através do fluxo de algum fluido. Ela é um campo bem estabelecido em muitas disciplinas de diferentes engenharias: elétrica, eletrônica, mecânica, civil, aeronáutica e também em muitas outras áreas.

Num primeiro momento, a simulação CFD fornece uma visão geral do campo de fluxo. E a interpretação qualitativa dos campos de vazão e pressão é o primeiro passo para criar ou melhorar um projeto. Posteriormente, as simulações fornecem estimativas quantitativas precisas das propriedades do campo de fluxo, como o fluxo médio em uma determinada diferença de pressão, os coeficientes de arrasto e sustentação em torno de corpos submersos ou a qualidade do ar em uma sala ventilada.

Muitas vezes o foco principal de uma simulação CFD é entender como o fluxo afeta outros parâmetros do processo. Por exemplo, o resfriamento efetivo de algum componente eletrônico em um computador. Nessa aplicação o fluxo de ar circundante deve ser parcialmente ou totalmente compreendido e é parte integrante da definição do processo. Da mesma maneira que o fluxo influencia nos parâmetros de um processo ou aplicação física, ele também é afetado por eles. Por exemplo, o calor gerado por um componente eletrônico afeta a densidade do fluido ao seu redor e as propriedades do fluxo desse fluido.

CFD é usado por engenheiros e cientistas para entender, prever e projetar o fluxo de fluidos em sistemas fechados e abertos. As simulações fornecem estimativas precisas dos padrões do fluxo, perdas de pressão, forças em objetos submersos, distribuições de temperatura e variações na composição do fluido dentro de um sistema. Essa abordagem se baseia em leis de conservação de momento, massa e energia. Com o CFD é possível modelar diferentes tipos de fluxos, por exemplo, monofásicos laminares e turbulentos, multifásicos, não isotérmicos e reativos.

A equação de Navier-Stokes contém um termo de flutuabilidade no lado direito para levar em conta a força de sustentação devido à expansão térmica que causa as variações de densidade no fluido:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \rho\mathbf{g}, \quad (2.16)$$

em que, nesta expressão, as variáveis dependentes para o escoamento são:

- \mathbf{u} é o vetor de velocidade do fluido (m/s);
- p é a pressão (Pa);
- \mathbf{g} é a aceleração gravitacional (m/s^2);
- ρ é a densidade do fluido dependente da temperatura (kg/m^3);
- μ é a viscosidade dinâmica dependente da temperatura ($N \cdot s/m^2$).

Como a equação contém apenas informações sobre o gradiente de pressão, ela estima o campo de pressão até uma constante. Para definir essa constante, é preciso fixar arbitrariamente a pressão em um ponto do modelo. Nenhuma condição de deslizamento se aplica aos contornos, ou seja, a velocidade resultante entre o fluido e as paredes do problema é igual a zero.

No estado estacionário, o balanço de calor para um fluido se reduz à seguinte equação:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0. \quad (2.17)$$

em que, T representa a temperatura, k denota a condutividade térmica e C_p é o calor específico.

Um passo importante na configuração de um modelo CFD, antes de iniciar a simulação, é avaliar o regime de vazão do fluido, apurando se o fluxo permanece laminar ou se torna turbulento. Essa análise é importante, também, para se entender quão fina deve ser a malha necessária para resolver gradientes de velocidade e temperatura. Para tanto, são empregados quatro indicadores: os números de Reynolds, Grashof, Rayleigh e Prandtl. Indicadores que são calculados utilizando-se as propriedades termofísicas do material.

O número de Prandtl é a razão entre a viscosidade do fluido e a difusividade térmica, definido por:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\gamma}, \quad (2.18)$$

sendo que, ν é a viscosidade cinemática e γ é a difusividade térmica. Sabe-se também que:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ e } \gamma = \frac{k}{(\rho C_p)}, \quad (2.19)$$

onde,

- μ é a viscosidade dinâmica ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$);
- k é a condutividade térmica ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$);
- C_p é o calor específico ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$);
- ρ é a densidade (kg/m^3).

$$\therefore \text{Pr} = \frac{\mu C_p}{k}. \quad (2.20)$$

O número de Prandtl também indica a espessura relativa da camada limite externa, δ , e a camada limite térmica, δ_T . Geralmente, é razoável estimar a razão δ/δ_T pela relação:

$$\frac{\delta}{\delta_T} = \sqrt{\text{Pr}} \quad (2.21)$$

A camada limite externa é a distância da parede que separa o sólido do fluido até a região onde o fluido se estabiliza. É diferente da camada limite de momento, δ_M , que mede a distância da parede ao pico de velocidade do fluido. A espessura da camada limite de momento pode ser avaliada, usando o número de Reynolds [56].

$$\delta_M \approx \frac{L}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad (2.22)$$

L é o comprimento específico da parede.

O número de Reynolds estima a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas. É definido pela fórmula:

$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu}, \quad (2.23)$$

onde, U denota a velocidade típica em m/s.

O número de Reynolds é usado para prever o regime do fluxo. Geralmente, valores baixos de Re correspondem ao fluxo laminar e valores altos ao fluxo turbulento, com um valor crítico para o regime de transição que depende da geometria. O regime de transição neste caso ocorre quando Re está entre 2000 e 10^4 [57]. Ele também pode ser reescrito como a razão entre duas velocidades:

$$\text{Re} = \frac{U}{\mu/(\rho L)}, \quad (2.24)$$

$\mu/(\rho L)$ é homólogo a uma velocidade e pode ser visto como a velocidade típica devido às forças viscosas.

O número de Grashof representa a razão entre as forças flutuantes e viscosas, definido por:

$$\text{Gr} = \frac{\rho^2 g \alpha_p \Delta T L^3}{\mu^2}, \quad (2.25)$$

g é a aceleração gravitacional, ΔT é a diferença de temperatura e α_p é o coeficiente de expansão térmica. O valor de α_p para o ar pode ser obtido pela aproximação do gás ideal:

$$\alpha_p = \frac{1}{T}. \quad (2.26)$$

O número de Grashof também pode ser expresso como a razão entre duas velocidades:

$$\text{Gr} = \frac{U_0^2}{(\mu/(\rho L))^2}. \quad (2.27)$$

Em que, U_0 é definido por:

$$U_0 = \sqrt{g \alpha_p \Delta T L}. \quad (2.28)$$

U_0 pode ser considerado como a velocidade típica devido às forças de empuxo. Quando as forças de empuxo são grandes comparadas às forças viscosas, o regime é turbulento; caso contrário, é laminar. A transição entre estes dois regimes é indicada pela ordem

crítica do número de Grashof = 10^9 [56].

O número de Rayleigh é outro indicador do regime, definido por:

$$\text{Ra} = \frac{\rho^2 g \alpha_p C_p}{\mu k} \Delta T L^3. \quad (2.29)$$

Ele é semelhante ao número de Grashof, exceto que leva em conta a difusividade térmica, γ . O número de Rayleigh pode ser expresso em termos dos números de Prandtl e Grashof através da relação $\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}$ ou usando-se a Equação 2.28 o número de Rayleigh pode ser reescrito como a razão entre duas velocidades:

$$\text{Ra} = \frac{U_0^2}{(\nu/L)(\gamma/L)}, \quad (2.30)$$

em que, a razão γ/L pode ser vista como uma velocidade típica devido à difusão térmica.

Assim como o número de Grashof, um valor crítico de Rayleigh indica a transição entre fluxo laminar e turbulento. Para placas verticais, esse limite é cerca de 10^9 [58].

Como as forças viscosas limitam os efeitos da flutuabilidade, U_0 pode fornecer uma velocidade típica superestimada. Outra abordagem é usar U_1 , definido por:

$$U_1 = \frac{\gamma}{L} \sqrt{\text{Ra}}; \quad (2.31)$$

$$U_1 = \frac{k}{\rho C_p L} \sqrt{\text{Ra}}; \quad (2.32)$$

$$U_1 = \frac{U_0}{\sqrt{\text{Pr}}}. \quad (2.33)$$

U_1 é uma estimativa mais precisa da velocidade típica do fluido, pois a difusividade térmica e a viscosidade do fluido são usadas nos cálculos [57].

O número de Rayleigh, também, pode ser usado para estimar a espessura da camada limite térmica, δ_T . Quando Pr é da ordem de 1 ou maior, é definido pela seguinte fórmula:

$$\delta_T \approx \frac{L}{\sqrt[4]{\text{PrRa}}}. \quad (2.34)$$

2.5.4 Método dos Elementos Finitos

Grande parte dos problemas físicos estudados pelos engenheiros são caracterizados matematicamente na forma de equações diferenciais. A solução geralmente é encontrada a partir da utilização de um método analítico algébrico aplicado a uma geometria usualmente simples com condições de contorno também simples. Entretanto, para geometrias mais complexas e com diferentes tipos de materiais essa abordagem torna-se extremamente complexa ou, até mesmo, impraticável. Nesses casos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) está sendo cada vez mais empregado, uma vez que a sua generalidade torna possível implementá-lo em softwares computacionais de propósito geral para resolver uma ampla gama de problemas mecânicos, eletromagnéticos, térmicos, eletrônicos e também problemas multi físicos.

O MEF é baseado na divisão do domínio do problema em elementos geométricos menores e bem definidos, chamados de elementos finitos. A Figura 2.12 (a) mostra alguns elementos típicos para problemas de uma, duas e três dimensões e a Figura 2.12 (b) mostra um problema genérico dividido pelos elementos. A aproximação da solução geral pode ser obtida a partir do somatório das soluções encontradas para as regiões de cada elemento. Assim, o MEF envolve algumas etapas [59]:

1. Discretizar a região de interesse em um número finito de elementos não sobrepostos;
2. Derivar as equações governantes para cada elemento;
3. Solucionar o sistema de equações obtido.

É possível observar que quanto maior a quantidade de elementos gerados na região de interesse do problema, mais próximo o resultado final estará da solução exata. No entanto, um aumento excessivo dessa divisão ocasiona um aumento no custo computacional e também pode causar a não convergência do problema. A quantidade de elementos necessários para obter um resultado satisfatório deve ser determinado através da precisão desejada para o resultado final, fator que pode variar para diferentes regiões do domínio.

Devido à quantidade de cálculos que normalmente são realizados nesse método, programas computacionais foram desenvolvidos com o intuito de tornar a solução desses problemas possíveis, rápida e eficiente. Assim, o COMSOL, software comercial, foi empregado na modelagem do reator e dos fenômenos térmicos, eletromagnéticos e fluidodinâmicos que envolvem esse equipamento antes, durante e após o acontecimento de um curto-circuito e, também, durante a otimização.

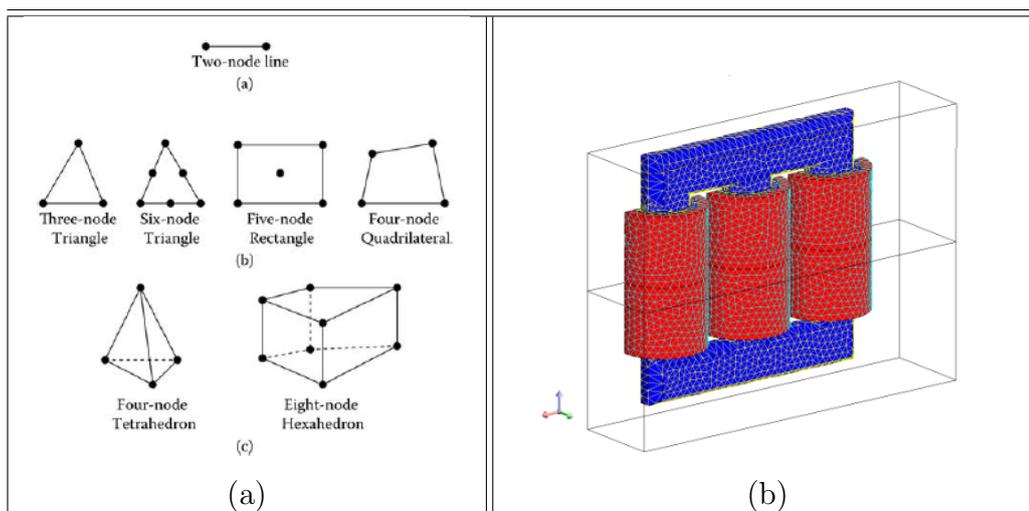


Figura 2.12: Exemplo de aplicação do MEF. (a) Elementos finitos característicos. (b) Domínio 3D subdividido.

Fonte: Adaptado de [59] e [60].

2.5.5 Otimização e PSO

Problemas de otimização referem-se aos estudos em que se busca minimizar ou maximizar uma função matemática. Essa função, representa o problema através da escolha sistemática, dentro de um conjunto de soluções viáveis, dos valores das variáveis . Assim, esse processo visa determinar a solução ótima de um determinado problema sem a necessidade de testar todas as possibilidades dos conjuntos de soluções. Nesse contexto, é de grande auxílio o uso de alguns métodos ou técnicas.

Os algoritmos evolucionários, em especial os algoritmos genéticos, têm sido amplamente utilizados. Essas técnicas, ao serem comparadas com os métodos tradicionais de programação, possuem a vantagem de trabalhar com uma menor quantidade de informações não precisando, por exemplo, calcular gradientes, derivadas, hessianas etc. Além disso, essas técnicas são de fácil implementação e são ferramentas de busca global [61].

No caso da otimização mono objetivo, deseja-se minimizar ou maximizar uma única função que contém as variáveis de controle, variáveis que representam o problema. Um problema de otimização mono objetivo possui a seguinte formulação geral:

$$\text{Otimizar } f(\vec{x}), \quad (2.35)$$

sujeito a,

$$g_j(\vec{x}) \leq 0, \text{ para } j = 1, \dots, q; \quad (2.36)$$

$$h_j(\vec{x}) = 0, \text{ para } j = q + 1, \dots, m; \quad (2.37)$$

$$l(i) \leq x_i \leq u(i), \quad 1 \leq i \leq n; \quad (2.38)$$

Sendo que, $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)$ é o vetor de variáveis de controle de dimensão n . A função $f(\vec{x})$ é conhecida como função objetivo do problema, ela é a função que se deseja otimizar podendo ser minimizada ou maximizada. $l(i)$ e $u(i)$ representam as restrições laterais que definem o espaço de busca, região onde a função objetivo do problema está definida. $g_j(\vec{x})$ e $h_j(\vec{x})$ representam um conjunto de restrições de desigualdade de dimensão q e um conjunto de restrições de igualdade de dimensão m , respectivamente. O ponto $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é denominado ponto ótimo. Este ponto é formado pelas variáveis de controle que otimizam $f(\vec{x})$ e satisfazem as restrições. Assim, $f(x^*)$ é o valor ótimo do problema.

O algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) foi proposto por James Kennedy e Russell Eberhart em 1995 [62]. Ele é inspirado no voo de um bando de pássaros, isto é, similar aos movimentos de uma população de aves que pretendem encontrar alimento. A abordagem pode ser vista como um algoritmo comportamental distribuído que realiza uma busca multidimensional. Logo, o modelo baseia-se principalmente nos princípios básicos de auto-organização que são usados para descrever a dinâmica de sistemas complexos. PSO pode ser aplicado em vários problemas de otimização, pois é um método que possui como vantagens a simplicidade, facilidade de implementação e alta taxa de convergência [63].

A equação da velocidade, Equação 2.39, é responsável por representar o movimento da partícula i no espaço de busca e a nova posição da partícula é atualizada a partir da Equação 2.40. As equações de velocidade e posição do método são escritas respectivamente, como:

$$v_{t+1}^i = wv_t^i + c_1r_1(p_t^i - x_t^i) + c_2r_2(p_t^g - x_t^i), \quad (2.39)$$

$$x_{t+1}^i = x_t^i + v_{t+1}^i, \quad (2.40)$$

em que,

- w é o coeficiente de inércia;
- c_1 e c_2 são constantes de aceleração das partículas;
- r_1 e r_2 são números aleatórios $\in [0, 1]$;
- v_t^i é a velocidade da partícula i no instante t ;
- p_t^i é a melhor posição da partícula i no instante t ;
- p_t^g é a melhor posição de todo o enxame no instante t ;
- x_t^i é a posição da partícula i no instante t .

Observe que a movimentação da partícula é composta por três componentes: inércia, ótimo individual e ótimo global, Figura 2.13. Deste modo, cada partícula movimenta-se em direção ao seu ótimo individual (memória da partícula), ótimo global (ótimo do enxame) e possui uma velocidade que em conjunto com a inércia representa o movimento progressivo da partícula. O somatório dessas parcelas representa a nova posição da partícula [64, 65].

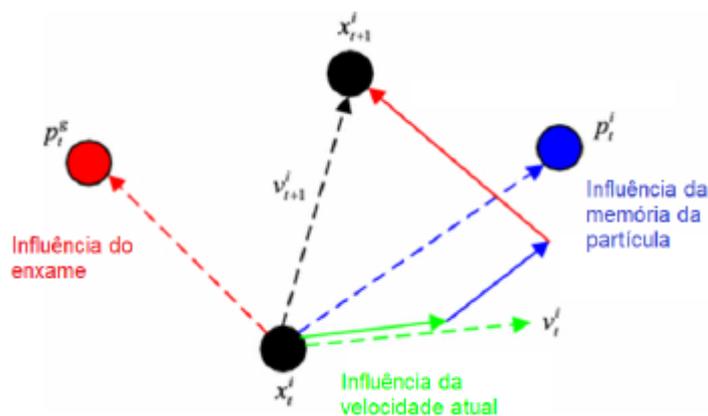


Figura 2.13: Esquema de interação das partículas no PSO a cada iteração.

Fonte: adaptado de [65].

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo aborda a metodologia utilizada na modelagem, na validação, na otimização, na construção e nos testes em bancada do modelo otimizado proposto para o reator do protótipo de LCC-SC instalado no laboratório NITEE. Os conceitos apresentados no capítulo 2 serão aplicados nestes estudos. Num primeiro momento, realizou-se a implementação de um modelo no software de elementos finitos para representar o reator do protótipo. Esse estudo preliminar tem o objetivo de confrontar os dados de simulação com os ensaios de comissionamento realizado e, assim, validar os modelos eletromagnético, térmico e fluidodinâmico. Todos os processos físicos foram implementados no *software* COMSOL e conectados pelo acoplamento multifísico. Num segundo momento, tendo validado o modelo, o algoritmo PSO foi utilizado para realizar a otimização proposta. Esse algoritmo foi implementado utilizando a linguagem de programação Python no ambiente de desenvolvimento Spyder com o auxílio de bibliotecas específicas. Por último, o reator otimizado foi construído por meio de uma impressora 3D e os testes em bancada realizados. O fluxograma da Figura 3.1 mostra as etapas operacionais deste trabalho .

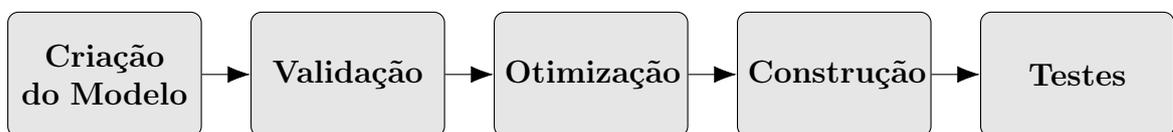


Figura 3.1: Etapas para o desenvolvimento do reator otimizado.

3.1 Protótipo Laboratorial de Baixa Tensão

Durante o projeto intitulado Desenvolvimento de um Protótipo em Média Tensão de Limitador de Corrente de Curto-circuito para Sistemas de Distribuição, realizado pelo laboratório NITEE em parceria com as empresas Adelco e Light, o protótipo de um LCC-SC

foi projetado e construído para ser testado na rede elétrica do laboratório. Esse equipamento conta com acabamento industrial e documentação completa em conformidade com o padrão industrial, Anexo A.

3.1.1 Circuito e Gabinete de Comando e Instrumentação

O diagrama monofásico simplificado do circuito de potência do protótipo do limitador é composto pelo conjunto C.E. (Chave Estática) e os reatores limitadores e pode ser analisado no Anexo A. No regime permanente, a corrente flui pelos semicondutores. Quando uma falta é detectada, o sinal das chaves é alterado para corte, forçando a passagem da corrente pelos reatores. O conjunto C.E. é composto por uma conexão de diodos em ponte e um conjunto de IGBTs. QE, QS e QBP são respectivamente os disjuntores de entrada, saída e desvio (*bypass*). Tirando o banco de reatores, todos os demais equipamentos de *hardware* e controle ficam instalados no gabinete principal, Figura 3.2.

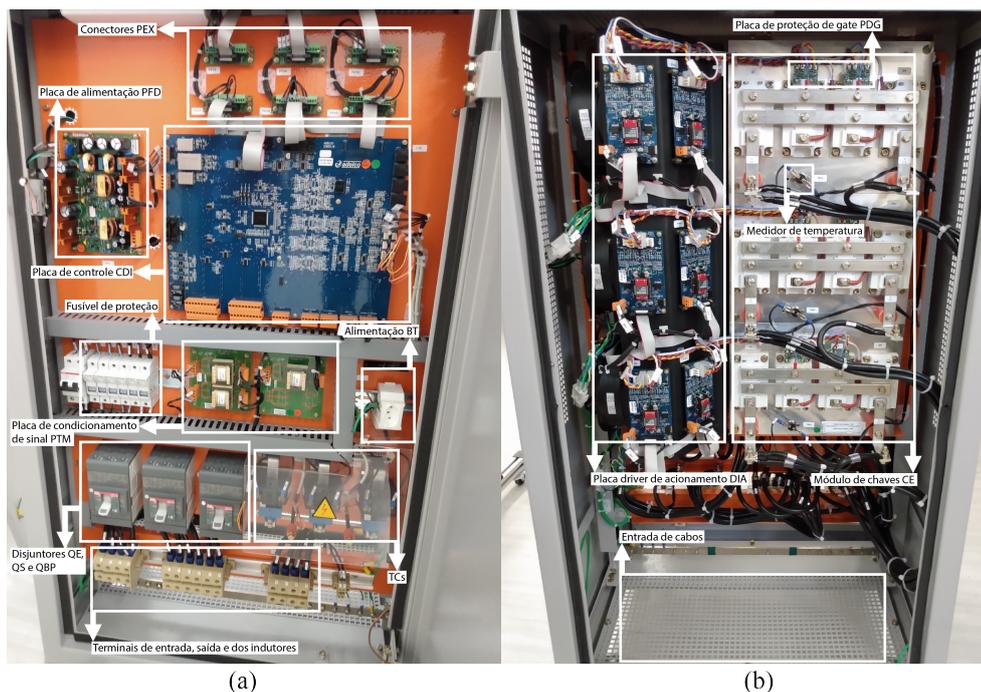


Figura 3.2: Gabinete principal do LCC-SC desenvolvido para o laboratório NITEE.

Com o intuito de efetuar os ensaios com completa segurança, três reatores foram instalados na saída do disjuntor de alimentação do laboratório, de modo que a corrente de um curto-circuito franco não ultrapasse o valor máximo desejado. Deste modo, os principais parâmetros que o protótipo precisou atender foram: tensão de linha igual a $220 V_{rms}$, corrente nominal igual a $17 A_{rms}$ e corrente prospectiva de $180 A_{rms}$. Na Figura 3.3 é possível ver a representação de uma das fases do circuito trifásico construído no

laboratório.

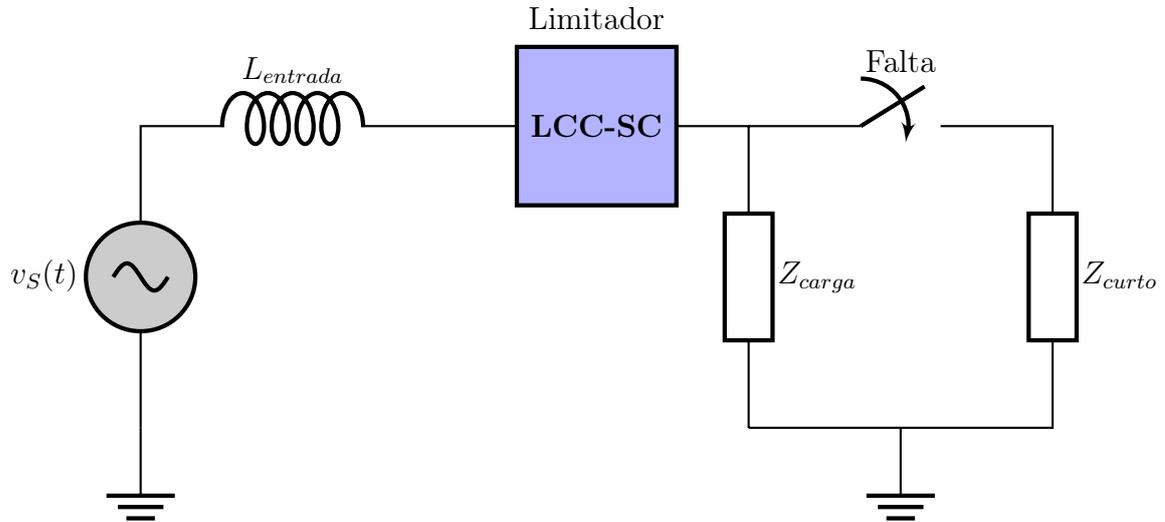


Figura 3.3: Circuito construído no laboratório para testes no protótipo.

3.1.2 Reatores de Limitação

Esse módulo é composto por três reatores secos monofásicos com núcleo de ar, vistos na Figura 3.4. Neste trabalho, definiremos que corrente dinâmica de curto suportável é o valor instantâneo máximo de corrente que os reatores suportam e a corrente térmica de curto suportável é o valor máximo de corrente de curto-circuito em regime permanente que os reatores suportam.

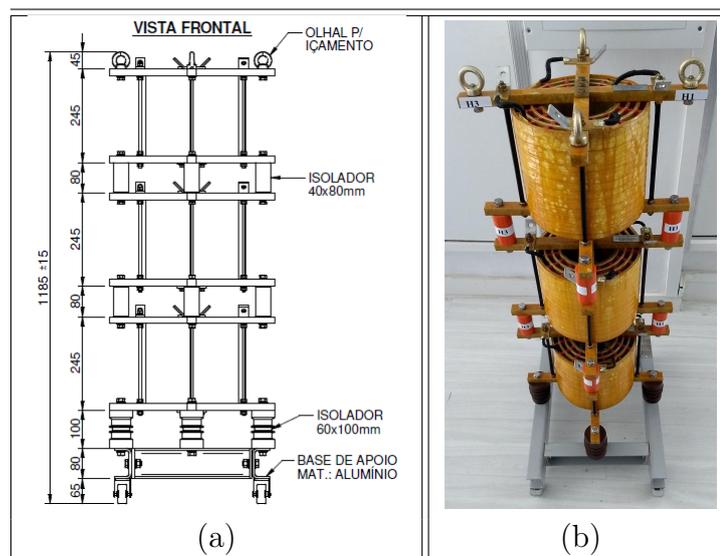


Figura 3.4: Projeto do módulo limitador de corrente. (a) Desenho técnico. (b) Equipamento fabricado.

A corrente térmica geralmente ocorre após os primeiros ciclos da corrente de curto-circuito, quando a componente contínua da corrente tende a zero. Com o equipamento fabricado e instalado nas dependências do laboratório, realizou-se estudos no *datasheet* com a intenção de se conhecer os valores de placa dos reatores. A Tabela 3.1 detalha os valores fornecidos para o reator superior no documento do fabricante. Essa e demais informações da fase de projeto e comissionamento estão contidas no Anexo B.

Tabela 3.1: Parâmetros de placa informados pelo fabricante no tap de 2 mH do reator superior.

Parâmetro	Valor
Potência (kvars)	2
Tensão (V)	220
Corrente (A)	50
Frequência (Hz)	60
Indutância (mH)	2,0
Resistência ($m\Omega$)	128,48
Reatância ($m\Omega$)	790,60
Impedância ($m\Omega$)	800,97
Corrente térmica de curto suportável (kA/s)	0,1
Corrente dinâmica de curto suportável (kA)	0,25

3.2 Modelagem do Reator com MEF

O software COMSOL oferece soluções computacionais para problemas eletromagnéticos, térmicos, fluidodinâmicos, entre outros. Portanto, o software é plenamente adequado para esse tipo de estudo. Assim, as simulações apresentadas nesta seção têm como principal objetivo criar um modelo que represente a atuação do reator durante um curto-circuito, levando em consideração a sua instalação em um espaço aberto, por exemplo, uma subestação. A partir disso, realizar a otimização e validar com os ensaios em bancada.

O processo de desenvolvimento de uma simulação em elementos finitos é descrito pelas seguintes etapas:

1. definir a geometria;
2. selecionar ou modelar os materiais;
3. adicionar ao domínio as equações físicas necessárias;
4. definir as condições de contorno e iniciais;

5. definir a malha de elementos finitos;
6. selecionar um tipo de *solver*;
7. visualizar os resultados.

Sabe-se que o módulo limitador trifásico fabricado é composto por três reatores monofásicos com as mesmas especificações. Logo, apenas a geometria de um dos reatores foi desenhada no software. Ela foi totalmente baseada no documento do fabricante, Anexo B. A Figura 3.5 e a Tabela 3.2 apresentam as principais cotas do projeto.

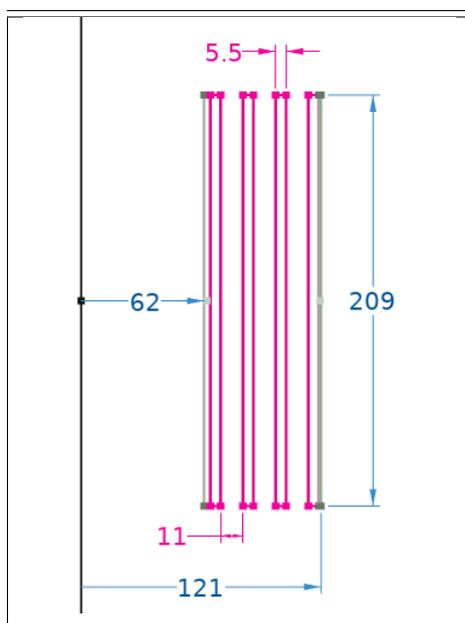


Figura 3.5: Geometria do reator do protótipo laboratorial, em mm.

Tabela 3.2: Parâmetros geométricos do reator fabricado.

Parâmetro	Valor
Número de encapsulamentos	4
Largura dos encapsulamentos (mm)	5.5
Distância entre os encapsulamentos (mm)	11
Altura dos encapsulamentos (mm)	209
Raio interno (mm)	62
Raio externo (mm)	121

3.2.1 Modelo Eletromagnético

Para otimizar o tempo de simulação, uma estratégia recorrente consiste em homogeneizar a bobina condutora [55, 66]. Esse processo agrupa todas as espiras em um único

domínio, mas exige uma boa qualidade da malha na região homogeneizada e negligencia a isolamento entre os condutores. A Figura 3.6 ilustra o processo de homogeneização de uma bobina com N espiras.

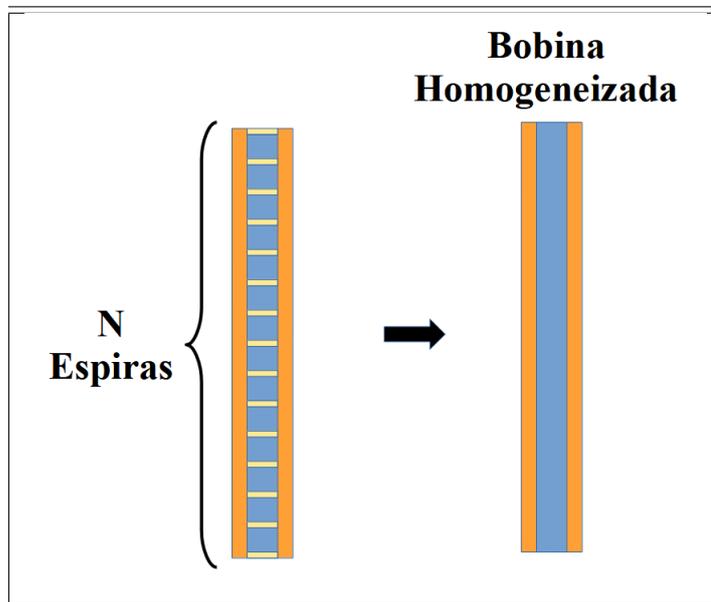


Figura 3.6: Processo de homogeneização da bobina do reator.

Utilizou-se também, uma abordagem simplificada de maneira que apenas a simetria axial foi desenhada. Essa técnica permite reduzir o domínio de solução, baseado na simetria do problema, diminuindo bastante o custo computacional. A Figura 3.7 apresenta a modelagem completa do domínio do problema com a semi circunferência que determina o seu limite e com cada região definida pelos seus respectivos materiais. Sendo que, o isolante utilizado é o DMD classe F (isolante elétrico laminado de 3 camadas, composto de filme poliéster e recoberto em ambos os lados com fibras de poliéster).

A região infinita é usada para delimitar o domínio de solução, região azul escuro. Sobre toda essa região emprega-se a condição de contorno de *Dirichlet* em que o potencial vetorial magnético é definido como zero, $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$. Como mencionado, por ser utilizado uma geometria axissimétrica 2D, um eixo de simetria é colocado na fronteira esquerda.

Após definir a geometria, é preciso modelar os principais parâmetros elétricos dos materiais utilizados na fabricação dos encapsulamentos do reator, como o alumínio e o isolante DMD. A Figura 3.8 mostra o valor da condutividade elétrica do alumínio em função da temperatura. Já a condutividade elétrica do ar ambiente e do isolante é igual a zero. A permissividade elétrica e a permeabilidade magnética utilizada em todos os materiais foram: $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m e $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, respectivamente.

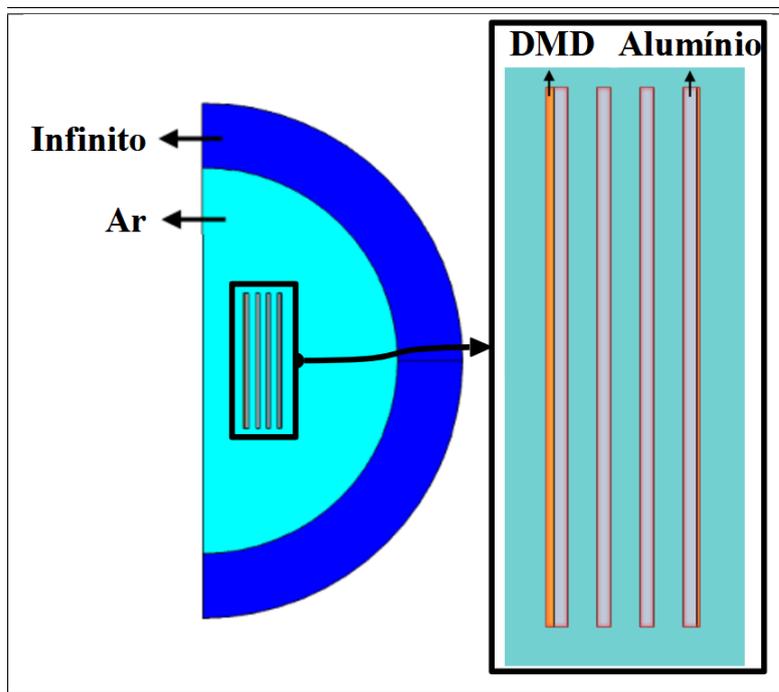


Figura 3.7: Modelagem eletromagnética do reator com detalhe nos encapsulamentos.

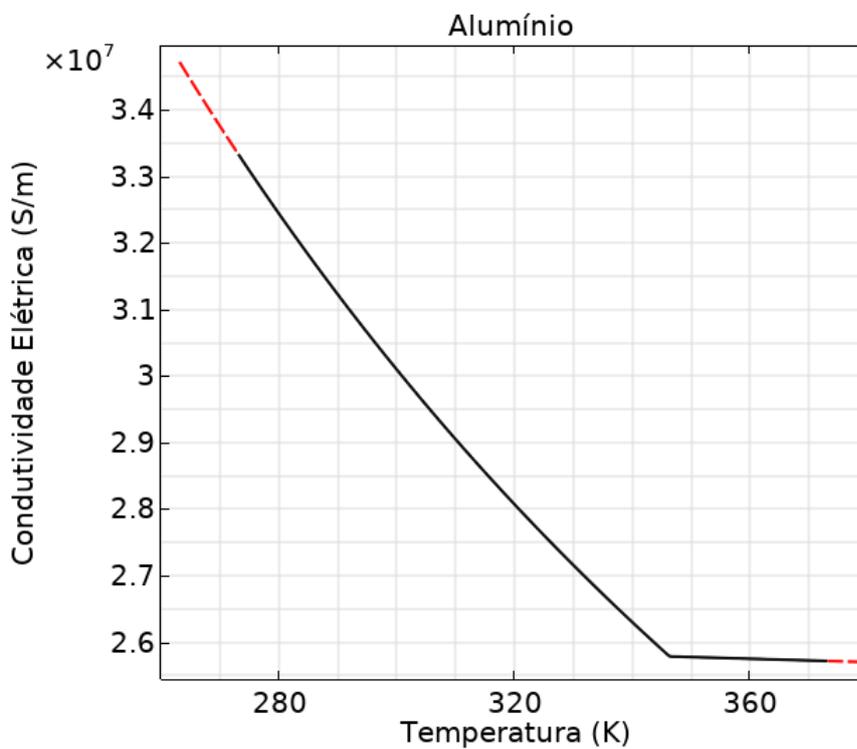


Figura 3.8: Condutividade elétrica do alumínio em função da temperatura.

Uma vez que esse primeiro modelo tem como principal objetivo validar os valores nominais do reator, realizou-se uma simulação eletromagnética em regime permanente com uma corrente senoidal de $50 A_{\text{rms}}$ e 60 Hz. Geralmente, quando reatores com núcleo de ar são utilizados para limitar correntes de curto-circuito, seus encapsulamentos são conectados em paralelo para atenuar o desgaste nas bobinas e diminuir a espessura do cabo na fabricação. Entretanto, no protótipo, pelo fato de a condição de falta máxima ser delimitada em valores toleráveis para a estrutura do laboratório, o fabricante preferiu conectar os encapsulamentos em série. A Figura 3.9 mostra o circuito implementado.

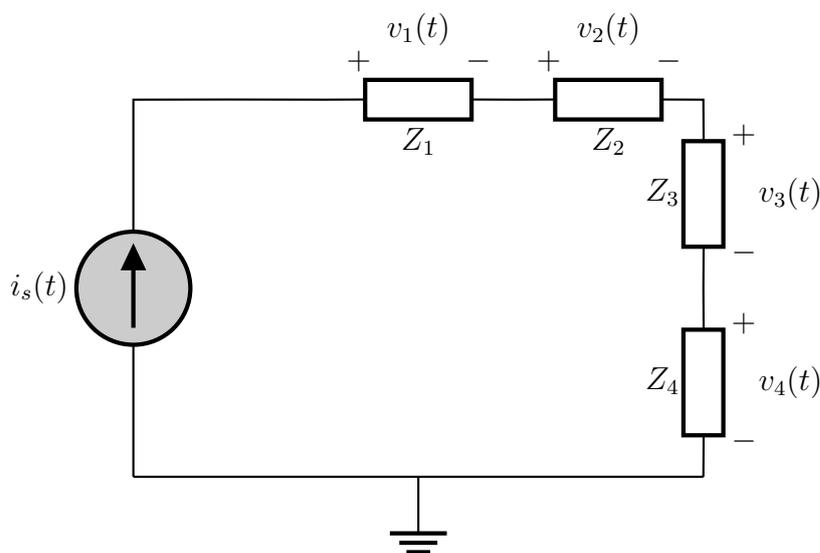


Figura 3.9: Circuito equivalente.

Conforme mostrado na Figura 3.9, os quatro encapsulamentos do reator são acoplados a uma fonte de corrente ideal. O *software* aplica a corrente $i_s(t)$ como entrada do modelo de elementos finitos que retorna as tensões calculadas em cada bobina. Sendo que, $v_1(t)$ é a tensão no encapsulamento mais interno, $v_2(t)$ é a tensão no segundo encapsulamento, $v_3(t)$ é a tensão no terceiro encapsulamento e $v_4(t)$ é a tensão no encapsulamento mais externo.

Segundo o fabricante, cada encapsulamento possui uma bobina com 38 espiras, totalizando 152 espiras no tape de 2 mH e um fator de preenchimento de 90,90%. Esse valor é alcançado pelo fato de o condutor utilizado possuir uma seção retangular. As demais informações estão detalhadas no Anexo B.

A Figura 3.10 apresenta a divisão do domínio de solução após a aplicação do método de elementos finitos. Nela é possível observar, de maneira mais detalhada, a aplicação do método na parte dos encapsulamentos (condutores e isolantes). Quanto maior o número de subdivisões do domínio do problema, mais próximo da solução exata o método converge,

entretanto o custo computacional também aumenta. Por essa razão, uma técnica muito utilizada consiste em aumentar o tamanho dos elementos em regiões de pouca relevância para o problema, nesse caso, quanto mais longe do reator e mais próximo da região infinita. Outra técnica consiste em mudar o formato geométrico dos elementos finitos dependendo da região em que eles estão inseridos. Por isso, dentro dos encapsulamentos os elementos são quadriláteros.

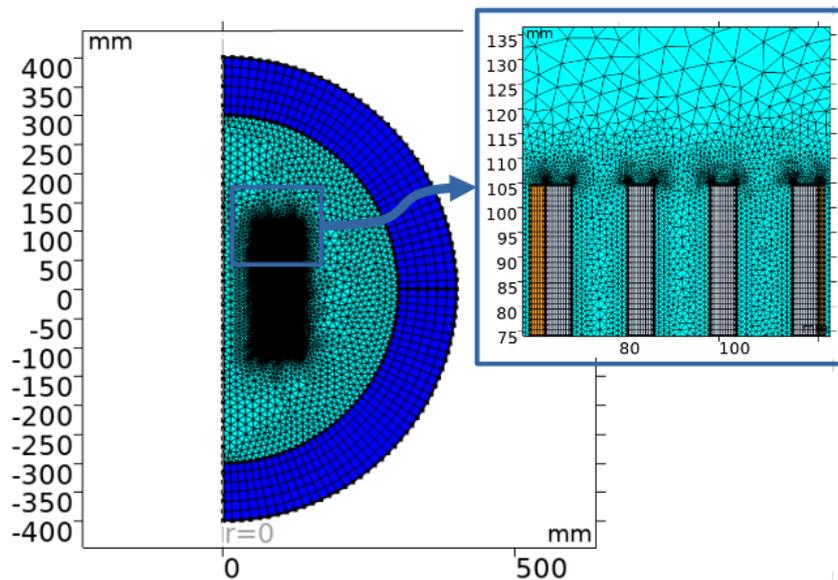


Figura 3.10: Método dos Elementos Finitos aplicado ao domínio do problema.

3.2.2 Modelo Térmico e Fluidodinâmico

Realizou-se, também, um estudo para avaliar e validar os processos térmico e fluidodinâmico no aquecimento e no resfriamento do reator durante o seu funcionamento. A temperatura foi analisada nos domínios do condutor, do isolante e do ar ambiente próximo ao reator que foi incorporado ao estudo para se entender o processo convectivo. Novamente, apenas a simetria axial foi desenhada, mas um retângulo foi adicionado para limitar os estudos térmico e fluidodinâmico. A Figura 3.11 apresenta a modelagem completa do domínio do problema com a semi-circunferência que determina o limite eletromagnético e o retângulo que determina o limite térmico e fluidodinâmico.

Na Figura 3.11 o fluido preenche a cavidade retangular de modo que ele flui livremente dentro da cavidade e pode, também, atravessá-la. As bordas da cavidade são mantidas

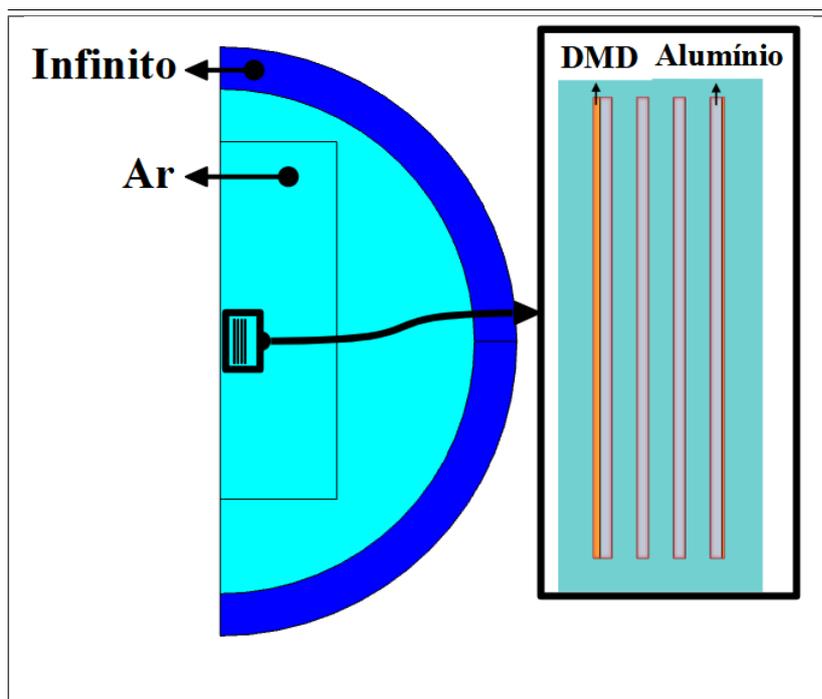


Figura 3.11: Modelagem eletromagnética, térmica e fluidodinâmica do reator com detalhe nos encapsulamentos.

com a temperatura ambiente. O diferencial de temperatura produz a variação de densidade que impulsiona o fluxo flutuante. A região infinita é utilizada para delimitar o problema eletromagnético (região azul escuro) e a cavidade retangular delimita o problema térmico e fluidodinâmico. Essa região é definida como uma condição de contorno aberto,

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \begin{cases} 0, & \text{se o fluxo é para dentro} \\ \rho C_p \int_{T_{amb}}^T dT (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}), & \text{se o fluxo é para fora} \end{cases}, \quad (3.1)$$

T_{amb} é a temperatura do ambiente e T é a temperatura calculada pela simulação. Quando o fluxo está na direção para fora do retângulo, a condição de divergência da velocidade é positiva, $\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} > 0$, caso contrário, a divergência é negativa, $\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} \leq 0$. Em que, \mathbf{n} é o vetor normal que aponta para fora da fronteira do retângulo.

Após desenhar a geometria, é preciso modelar os principais parâmetros térmicos do alumínio, do DMD e do ar, também é preciso modelar os parâmetros fluidodinâmicos do ar. As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 e a Tabela 3.3 mostram os valores utilizados.

A simulação estima a temperatura do sistema devido ao aquecimento dos condutores nos encapsulamentos, influenciada, também, pelo resfriamento do fluxo de ar impulsionado

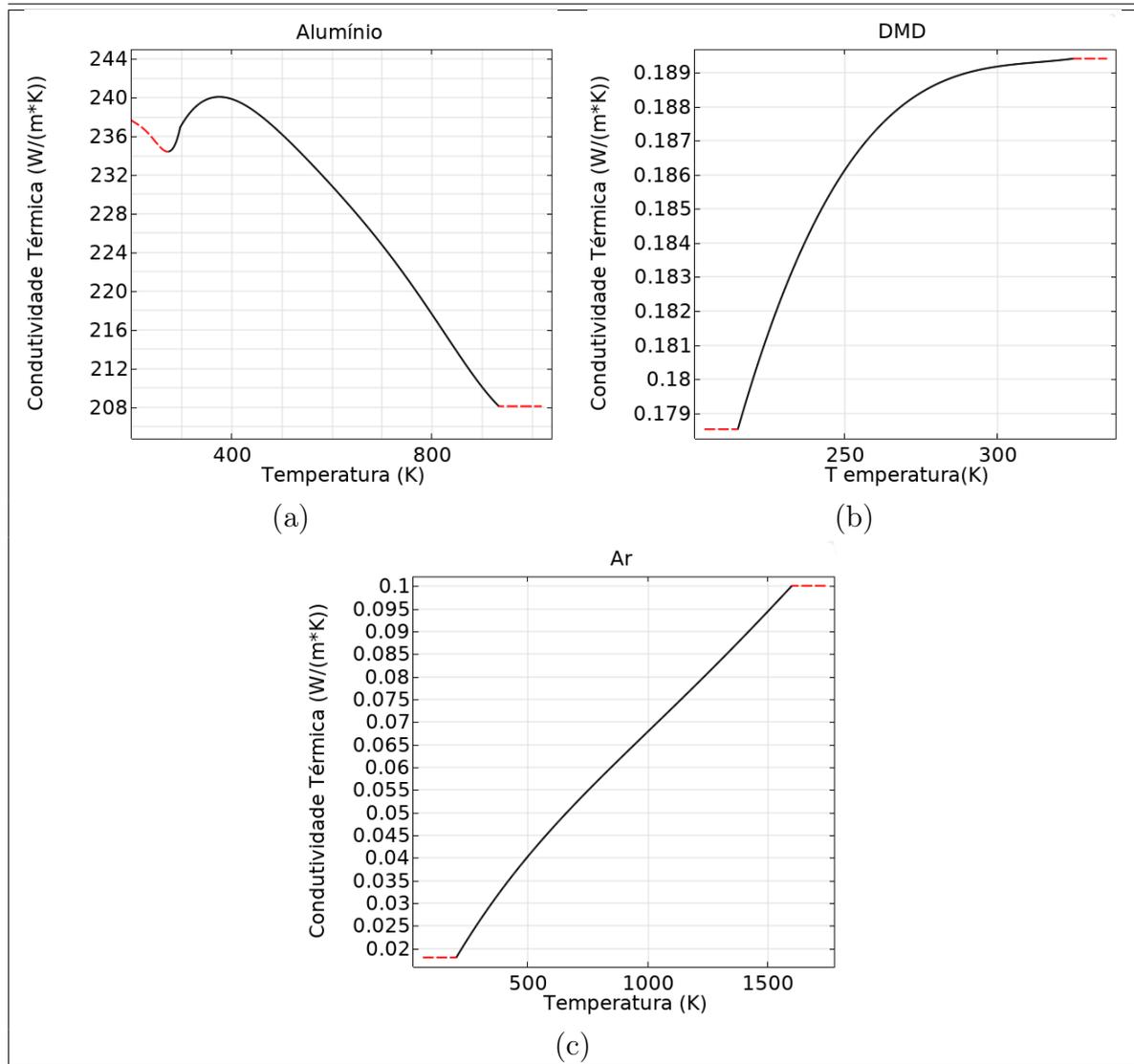


Figura 3.12: Condutividade térmica em função da temperatura. (a) Alumínio. (b) DMD. (c) Ar.

Tabela 3.3: Parâmetros térmicos e fluidodinâmicos.

Parâmetro	Alumínio	DMD	Ar
Cond térmica (W/(m · K))	Figura 3.12 (a)	Figura 3.12 (b)	Figura 3.12 (c)
Calor específico (J/(kg · K))	1.170,00	Figura 3.13 (a)	Figura 3.13 (b)
Viscosidade dinâmica (Pa · s)	-	-	Figura 3.14 (a)
Densidade (kg/m ³)	2.700,00	1.430,00	Figura 3.14 (b)
Cte específica do gás (J/(kg · K))	-	-	287,00

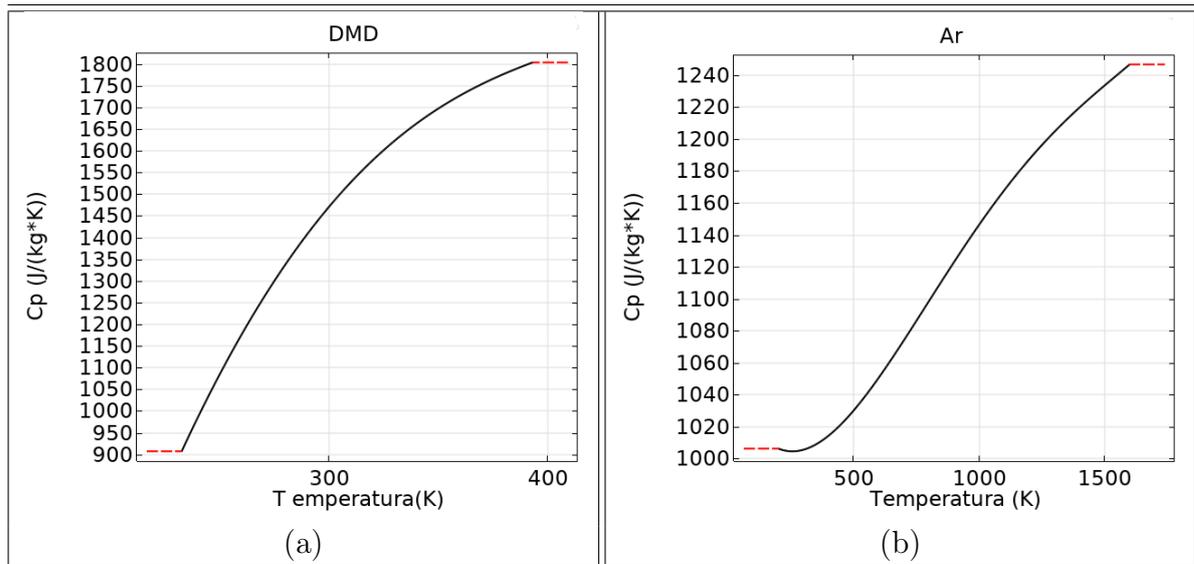


Figura 3.13: Calor específico em função da temperatura. (a) DMD. (b) Ar.

por fluatibilidade e irradiação para o ambiente circundante. Neste modelo, calcula-se o fluxo de ar não isotérmico em torno do reator, manipulando o acoplamento entre o transporte de energia, por condução, irradiação e convecção e o transporte de momento induzido por variações na densidade do ar. À medida que o ar aquece, as mudanças de densidade e pressão induzem um fluxo em direção ao topo da cavidade retangular.

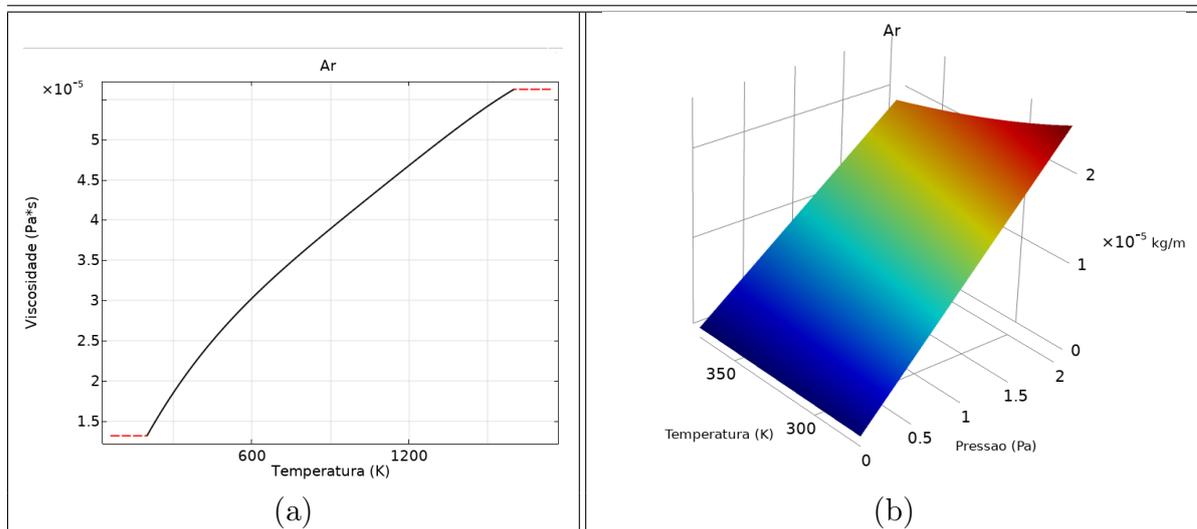


Figura 3.14: Parâmetros fluidodinâmicos do ar. (a) Viscosidade. (b) Densidade.

Antes de começar a implementar o modelo, é recomendado estimar o regime de vazão do fluido. Os números adimensionais de Rayleigh, Reynolds, Grashof e Prandtl comparam os efeitos viscoso, de empuxo, térmico e de inércia e permitem qualificar o escoamento como laminar ou turbulento. Isso facilita as configurações da modelagem, seguindo os princípios apresentados na subseção 2.5.3. Para realizar esse estudo prévio, considerou-

se a geometria dos encapsulamentos, a temperatura ambiente de $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ e uma temperatura máxima de $T_m = 100^\circ\text{C}$, limite máximo de temperatura tolerado durante os ensaios em bancada. Utilizou-se a temperatura média, $T = (T_m + T_{amb})/2$, como entrada dos parâmetros térmicos e fluidodinâmicos e a pressão atmosférica, $p = 1\text{ atm}$ [58]. Todos os valores dos parâmetros utilizados, estão mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros térmicos e fluidodinâmicos do Ar.

Parâmetro	Valores
Comprimento específico da parede (m)	0,209
Diferença de temperatura ΔT (K)	75
Densidade (kg/m^3)	1,0518
Viscosidade dinâmica ($\text{N} \cdot \text{s}/(\text{m}^2)$)	$2,0165 \times 10^{-5}$
Condutividade térmica ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	0,029044
Calor específico ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	1007,9
Coefficiente de expansão térmica (K^{-1})	0,0029793
Velocidade típica estimada (m/s)	0,809
Número de Prandtl	0,69978
Número de Grashof	$5,4429 \times 10^7$
Número de Rayleigh	3.809×10^7
Número de Reynolds	8819,3
Camada limite térmica (mm)	2,9088
Camada limite externa (mm)	2,4333
Camada limite de momento (mm)	2,2255

Como os números de Grashof, Rayleigh e Reynolds estão abaixo da ordem crítica de 10^9 , 10^9 e 10^4 , respectivamente, o escoamento do fluxo é definido como sendo laminar por toda a parede lateral dos encapsulamentos. Para se evitar problemas numéricos ao definir a malha, um refinamento deve ser feito nas camadas limites térmica, externa e de momento.

Conforme descrito na subseção 2.5.2, o processo de irradiação também foi levado em consideração nas extremidades dos encapsulamentos para uma temperatura ambiente de 25°C e um coeficiente de emissividade $\varepsilon = 0,8$, representado na Figura 3.15. A bobina foi homogeneizada, Figura 3.6, e o circuito mostrado na Figura 3.9 foi utilizado para validar o modelo térmico e CFD.

Realizou-se uma série de ensaios aplicando diversos valores de corrente nos terminais do reator e aferindo-se o valor da temperatura no encapsulamento por meio de um termopar do tipo K, Figura 3.16. Esses ensaios tiveram como objetivo mapear o processo de aquecimento e resfriamento do reator e validar os modelos térmico e CFD. Eles consistiram em aplicar uma corrente controlada durante o período de tempo necessário

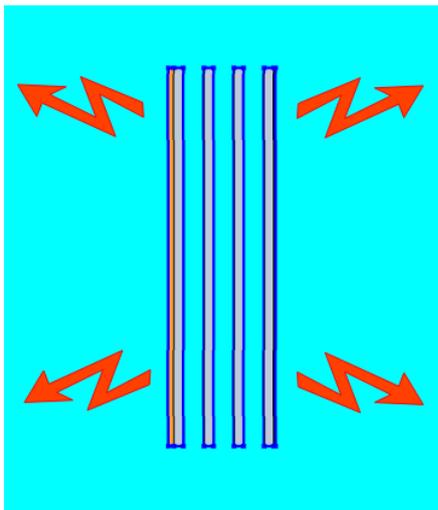


Figura 3.15: Contorno em azul utilizado para modelar a irradiação térmica no reator.

para a temperatura do reator entrar em estado estacionário. Em seguida, a fonte de corrente era desligada e o processo de resfriamento natural medido. Durante esses ensaios, a temperatura ambiente do laboratório sempre esteve próxima a 25°C

Para aplicar as correntes controladas nos terminais do reator e realizar as medições, utilizou-se a fonte 3120AFX da *Pacific Power Source*, [67], que possui uma potência total de 12kVA, o multímetro TY720 da *Yokogawa*, [68], que possui um pacote de comunicação capaz de conectá-lo ao computador e, assim, monitorar as medições em tempo real e salvá-las para serem processadas por outros *softwares*, e o termo visor VT04 da *Fluke*, [69], apenas para ajudar a entender a distribuição da temperatura no reator durante os ensaios. A Figura 3.17 mostra a bancada com esses equipamentos.

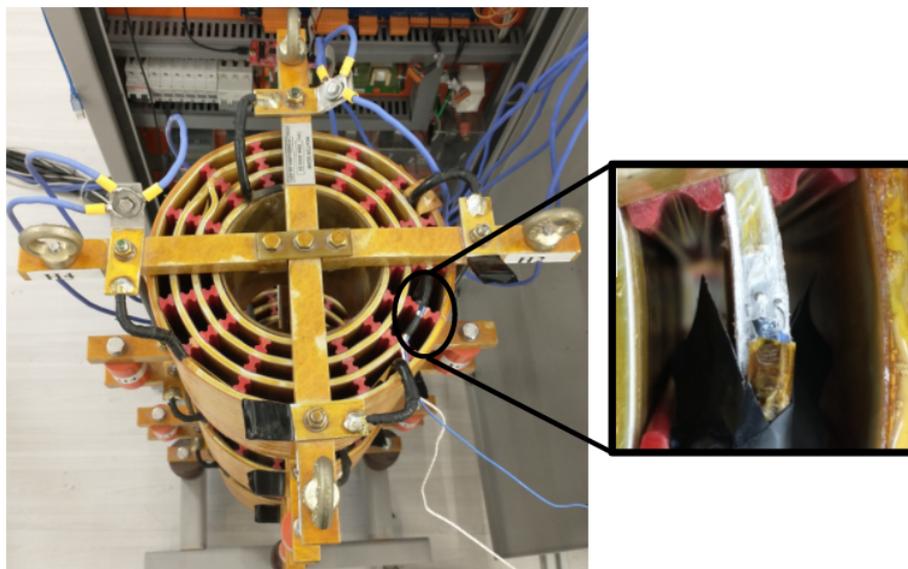


Figura 3.16: Reator com o termopar em um dos encapsulamentos.

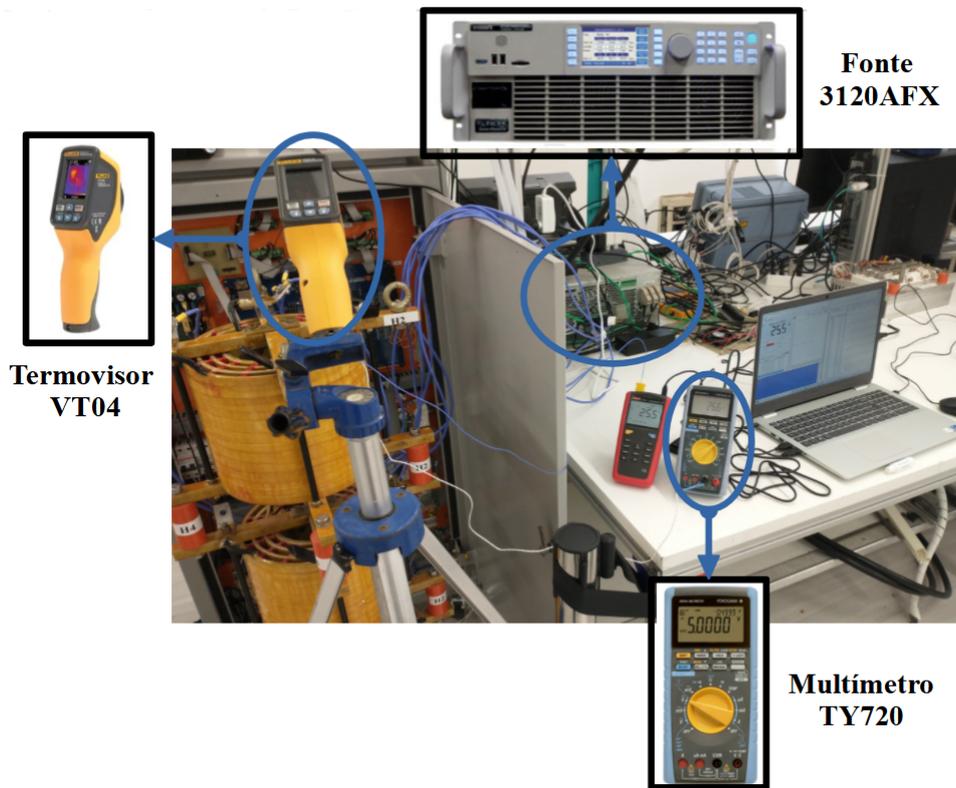


Figura 3.17: Bancada com os equipamentos para os ensaios térmicos.

3.3 Otimização com PSO

O procedimento de otimização leva em consideração o fato de que o regime de trabalho dos reatores é intermitente, eles devem atuar apenas no momento do curto-circuito, período de tempo que a chave semicondutora permanece aberta, Figura 2.6. Desta forma, neste estudo, as seguintes premissas foram levadas em consideração:

- O reator de núcleo de ar funciona por dez ciclos (60 Hz);
- A tensão de linha do sistema é de $220 V_{rms}$;
- A temperatura ambiente é de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- A geometria inicial é a mesma projetada pelo fabricante, Anexo B;
- Substituiu-se o condutor de seção retangular pelo de seção circular, para facilitar a construção.

Para realizar o processo de otimização do reator, os modelos eletromagnético, térmico e fluidodinâmico no software de elementos finitos foram acoplados e o seguinte circuito empregado:

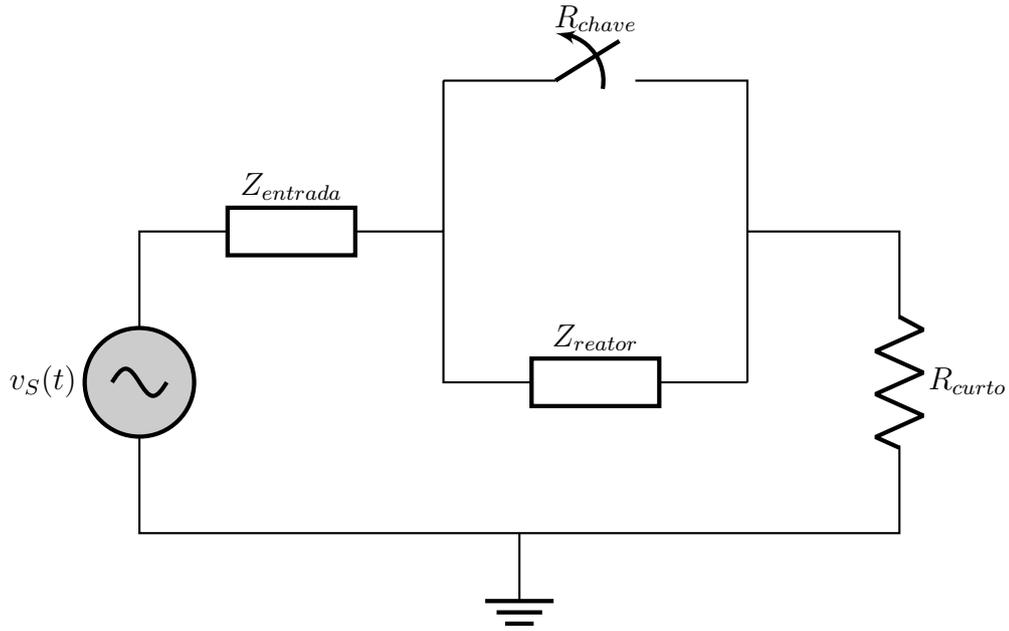


Figura 3.18: Circuito implementado no *software* de elementos finitos para realizar a otimização.

em que, $Z_{entrada} = 0.30445 + j0.71751 \Omega$, $R_{chave} = 1 \times 10^5 \Omega$ e $R_{curto} = 10 \times 10^{-3} \Omega$.

Levando em conta o cenário de atuação do reator, o principal objetivo da otimização é minimizar o volume total de condutor no reator, uma vez que a espessura dos isolantes é mantida fixa. Sendo que, todos os encapsulamentos do reator otimizado devem possuir o mesmo número de espiras e o mesmo diâmetro de condutor. Implementou-se o algoritmo PSO por meio da linguagem python utilizando a rotina desenvolvida por [70] e também a rotina desenvolvida por [71], responsável por fazer o acoplamento entre a rotina de otimização e o software de elementos finitos. Considerou-se 5 partículas e 200 iterações no algoritmo.

A Equação 3.2 apresenta a função objetivo e a Tabela 3.5 apresenta as variáveis de controle consideradas.

$$\text{função objetivo: } \min\{volume\}. \quad (3.2)$$

As restrições consideradas para esse problema, foram:

$$T_{max} \leq 50^\circ\text{C}; \quad (3.3)$$

$$0,9 \times Z_{reator} \leq Z_{reator} \leq 1,1 \times Z_{reator}. \quad (3.4)$$

Tabela 3.5: Variáveis de controle.

Parâmetro	Máximo	Mínimo
Número de encapsulamentos	4	1
Número de espiras por encapsulamento	50	10
Distância entre os encapsulamentos (mm)	22	5
Raio interno (mm)	100	10
Diâmetro do condutor (mm)	7,348	0,321

em que, T_{max} é a temperatura máxima calculada dentro da região condutora e isolante, sendo $50\text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura máxima permitida. $Z_{reator} = 0,8\ \Omega$ é a impedância calculada no início do projeto para o sistema do laboratório, o mesmo valor solicitado ao fabricante do protótipo.

3.4 Construção e Testes

Após realizar a otimização, o resultado foi transformado em um esboço para, então, ser confeccionado através de uma impressora 3D. A impressora utilizada foi a Core A3 da empresa GTmax3D [72] e o filamento utilizado foi o ABS. Com o auxílio dos *softwares* Solidworks e Simplify3D o reator otimizado foi projetado e impresso. A Figura 3.19 mostra o desenho técnico de uma das cruzetas e a Figura 3.20 mostra o desenho de um dos cilindros utilizados na montagem. Já a Figura 3.21 mostra a vista em 3D de todos os elementos que compõem a estrutura do reator otimizado, antes de serem impressos.

Realizou-se testes, baseado no circuito da Figura 3.22, com o protótipo laboratorial, de modo que se conseguisse entender como é a distribuição de corrente entre os IGBTs e o reator do protótipo, isto é, qual é a corrente em regime permanente, \mathbf{I}_r , que flui pelo reator mesmo quando os IGBTs estão conduzindo. Assim, a corrente nominal inicialmente projetada para todo o sistema do protótipo de LCC-SC fabricado para o laboratório, $\mathbf{I}_s = 12\ \text{A}_{\text{rms}}$, é aplicada ao circuito pela fonte controlada e as correntes \mathbf{I}_r e \mathbf{I}_c analisadas. A Figura 3.23 mostra o resultado deste ensaio.

Na Figura 3.23 fica evidente que a corrente que flui através do reator no regime nominal não é insignificante quando comparada a corrente do sistema, diferente do que é esperado nos LCC-SC e nos equipamentos utilizados com o propósito de limitação de corrente de curto-circuito. Isso se deve ao fato do arranjo de chaves do protótipo laboratorial já está dimensionado para atuar em $13,8\ \text{kV}$ que é a tensão do equipamento final.

Em seguida, a corrente \mathbf{I}_r foi aplicada ao reator otimizado de maneira que se pudesse

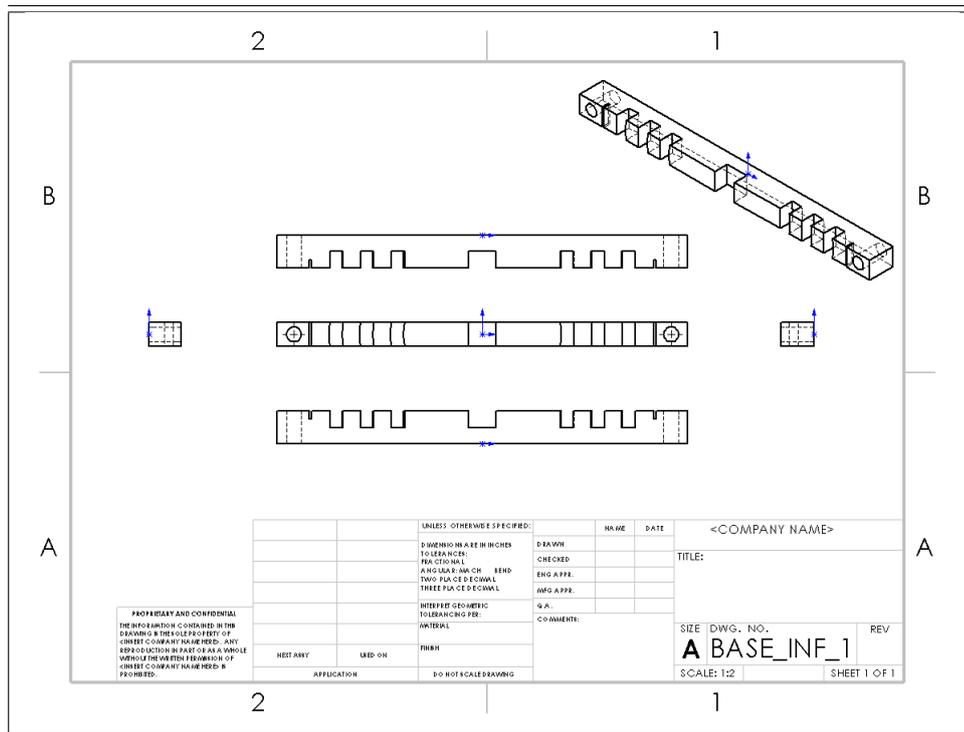


Figura 3.19: Desenho técnico de uma das cruzetas.

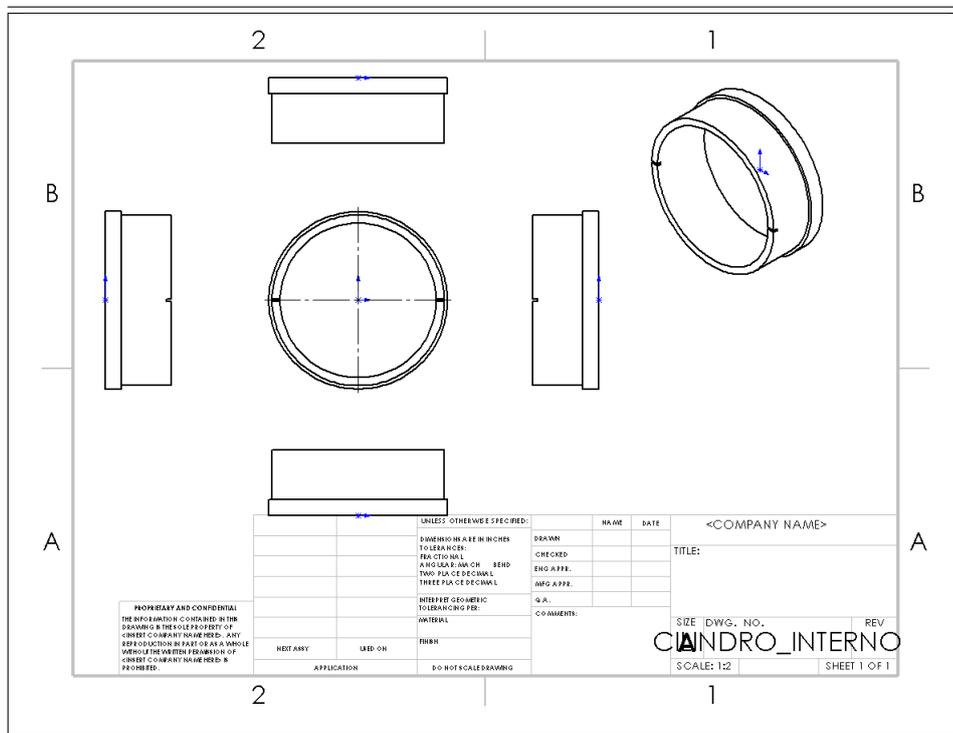


Figura 3.20: Desenho técnico de um dos cilindros.

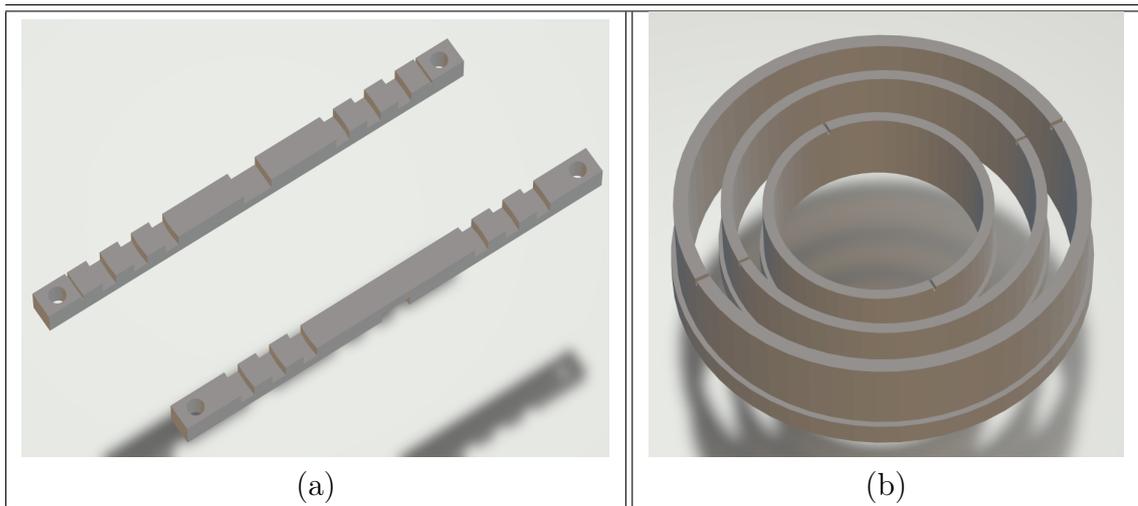


Figura 3.21: Vista 3D. (a) Cruzetas. (b) Cilindros.

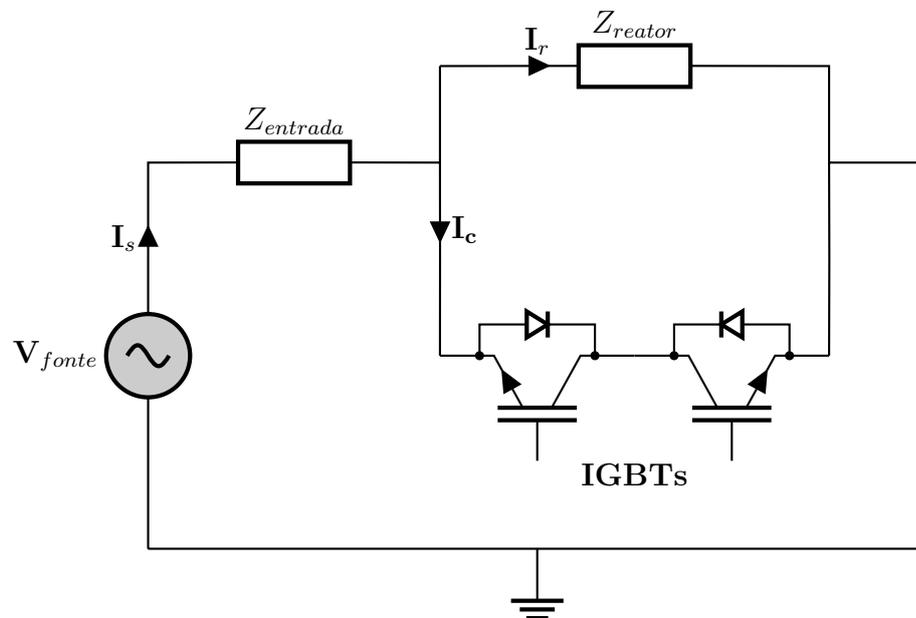


Figura 3.22: Circuito para testes de corrente nominal no reator do protótipo.

entender seu processo de aquecimento durante o regime nominal, antes da ocorrência de um curto circuito. A Figura 3.24 mostra a bancada montada e os equipamentos para os testes de corrente com o gabinete de IGBTs, o reator do protótipo, a fonte controlada e o medidor de corrente.

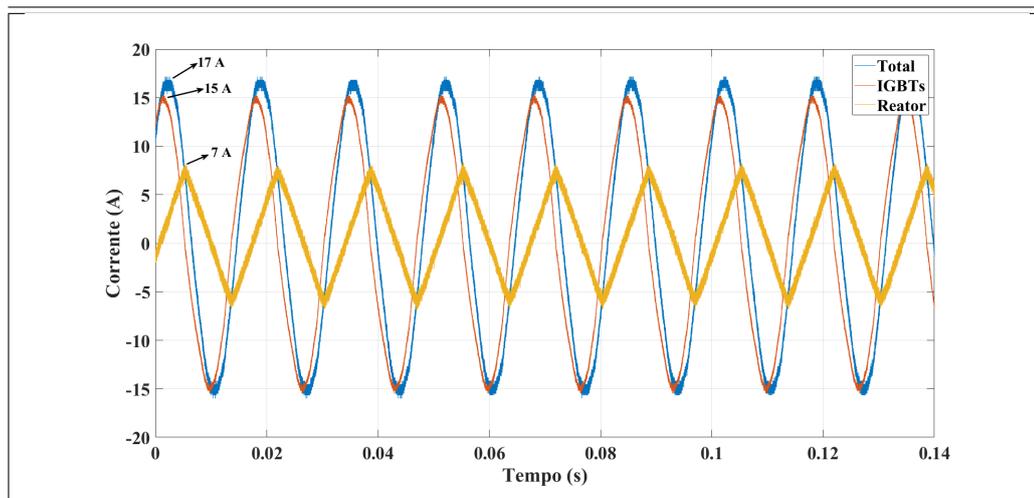


Figura 3.23: Correntes de regime permanente $i_s(t)$, $i_c(t)$ e $i_r(t)$.

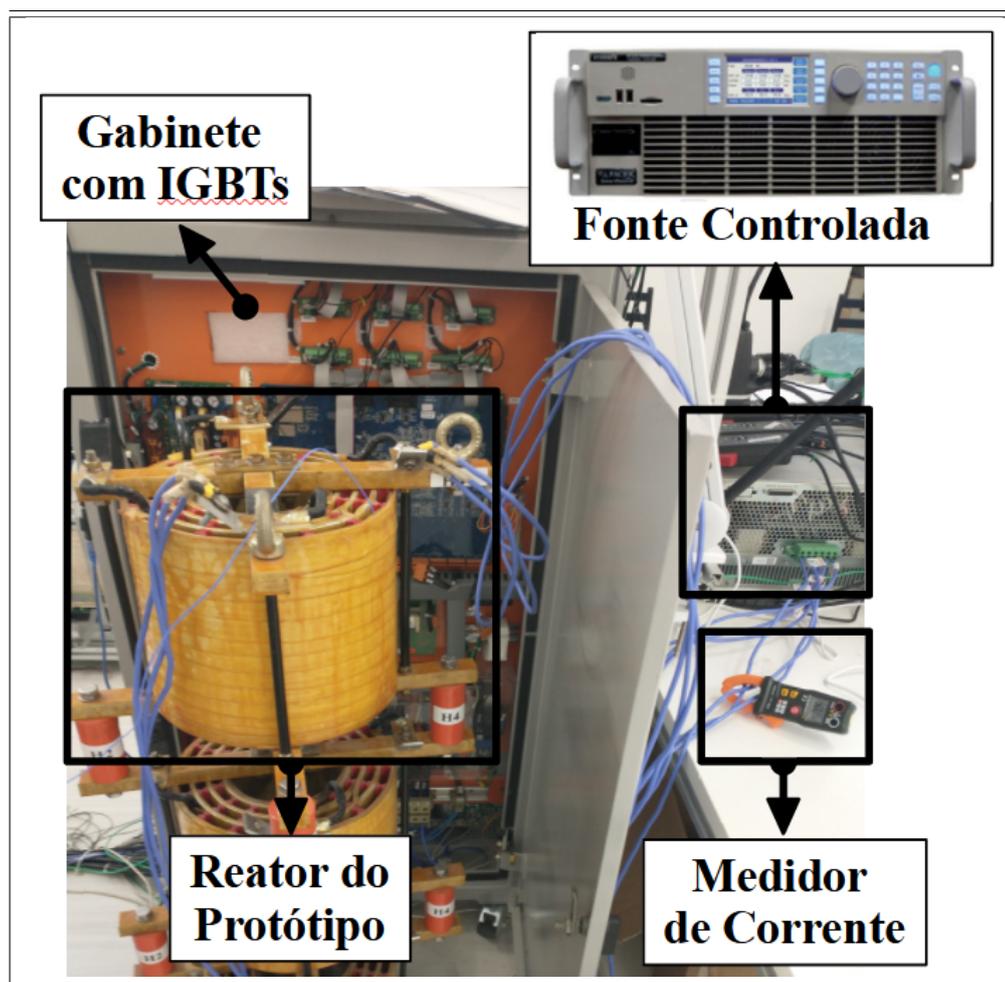


Figura 3.24: Bancada para testes de corrente no reator do protótipo.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho. A metodologia apresentada no capítulo 3 é o alicerce prático empregado na validação dos modelos de elementos finitos, confrontando os dados de simulação com os dados de comissionamento e de bancada, na otimização através do método PSO e, por fim, na construção do reator otimizado utilizando uma impressora 3D. É importante destacar que durante os ensaios apenas o reator superior foi conectado à rede elétrica, por isso ele não sofreu nenhuma influência eletromagnética e térmica dos demais reatores.

4.1 Validação dos modelos de elementos finitos

Segundo o *datasheet* do reator do protótipo, cada encapsulamento possui uma bobina com 38 espiras, totalizando 152 espiras no tape de 2 mH, e um fator de preenchimento de 90,90%, esse valor é alcançado pelo fato de o condutor utilizado possuir uma seção retangular com uma largura igual a 5 mm. O ensaio de comissionamento foi realizado com uma corrente de 50,23 A (60Hz) e calculado para uma temperatura de 75 °C, Anexo B.

A Figura 4.1 apresenta a densidade de fluxo magnético no reator simulado quando a corrente nominal de regime permanente, 50 A_{rms} , flui pelo circuito e a Tabela 4.1 mostra a comparação dos valores eletromagnéticos obtidos na simulação com os valores comissionado pelo fabricante. Nela é possível perceber que os valores de simulação são próximos aos do protótipo.

Conforme apresentado na subseção 3.2.2, os números adimensionais de Rayleigh, Reynolds, Grashof e Prandtl calculados, a princípio, mostram que o fluxo do ar será sempre

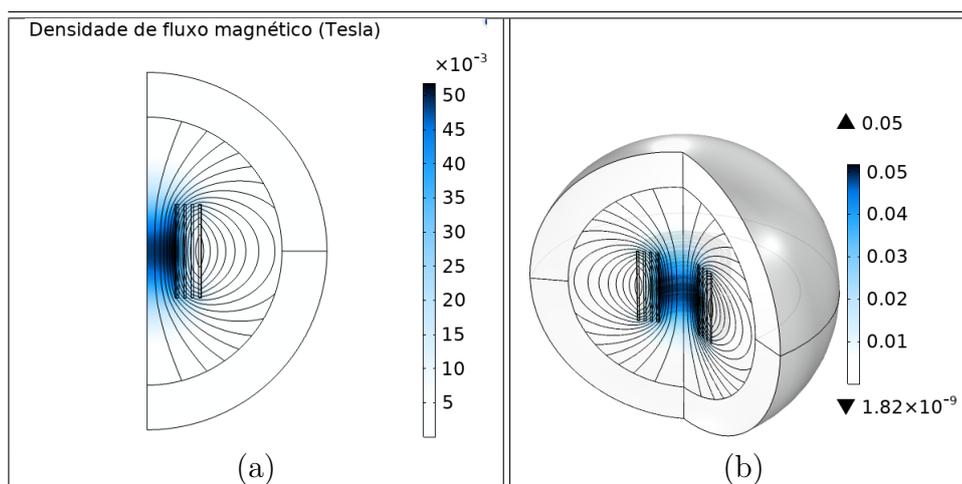


Figura 4.1: Densidade de fluxo magnético. (a) Vista 2D. (b) Vista 3D.

Tabela 4.1: Parâmetros eletromagnéticos obtidos na simulação \times comissionado.

Parâmetros	Simulado	Comissionado
Indutância (L)	2,0122 mH	2,097 mH
Resistência (R)	137,075 m Ω	128,480 m Ω
Reatância (X_L)	758,57 m Ω	790,60 m Ω
Impedância (Z)	770,86 m Ω	800,97 m Ω
Perdas (W)	345,83 W	331 W

laminar, até mesmo quando a temperatura do reator atingir 100 °C. Assim, aplicando-se uma corrente de modo que na simulação o reator atinja essa temperatura, esses dados puderam ser comprovados. A corrente aplicada na simulação foi de 100 A_{rms} e as Figuras 4.2 e 4.3, em 2D, mostram a distribuição de temperatura no reator e no ar circundante durante os processos de aquecimento e resfriamento, respectivamente.

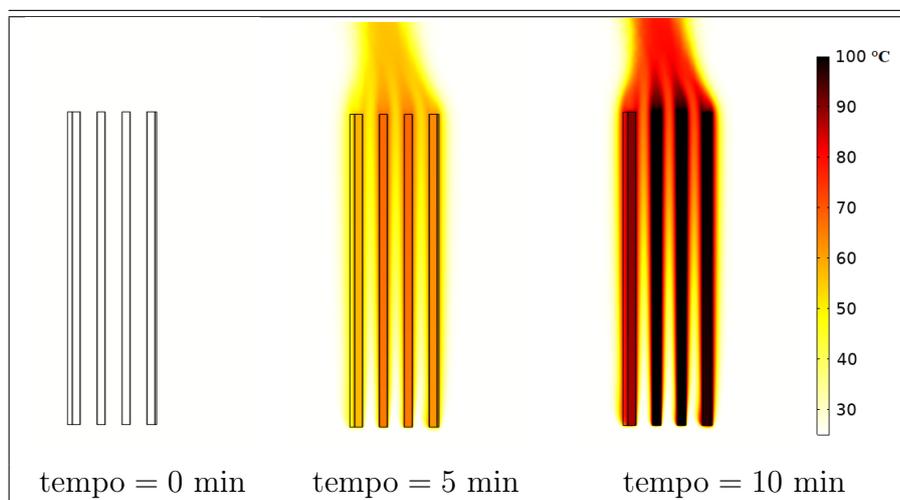


Figura 4.2: Distribuição de temperatura durante o processo de aquecimento.

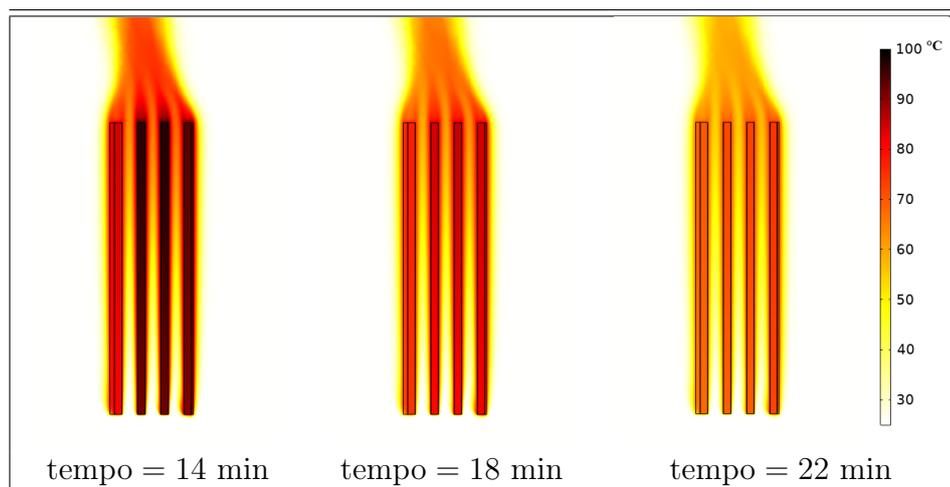


Figura 4.3: Distribuição de temperatura durante o processo de resfriamento.

Nas Figuras 4.2 e 4.3 é possível perceber que a distribuição de temperatura do ar circundante é maior na parte superior dos encapsulamentos, efeito que corrobora para validar o processo convectivo do ar, pois a convecção força o fluxo de ar quente para o topo. Vale ressaltar que a temperatura máxima observada no modelo simulado, aproximadamente 100 °C, é atingida quando tempo = 10 min. Já a Figura 4.4 compara a distribuição de temperatura medida pelo termo visor, mostrado na Figura 3.17, e o resultado da simulação quando a temperatura é máxima.

O aquecimento dos condutores localizados nos encapsulamentos centrais é mais intenso que os localizados nas laterais, devido ao fornecimento adicional de calor dos encapsulamentos adjacentes. Assim, as diferentes temperaturas dos condutores estabelecem uma diferença na resistência elétrica dos encapsulamentos. Esse resultado corrobora para confirmar a precisão da simulação no cálculo da distribuição de temperatura.

A Figura 4.5 mostra o fluxo de ar ambiente no entorno do reator. Ela representa o processo convectivo que é criado pelo aumento da temperatura no reator. Esse processo influencia tanto no aquecimento quanto resfriamento, sendo o responsável por evitar o aquecimento excessivo e, portanto, a degradação da isolamento elétrica. As setas foram normalizadas, pois essa imagem tem o objetivo de mostrar a distribuição do fluxo por toda a simulação. Na Figura 4.6 os campos de temperatura e velocidade do ar são colocados lado a lado de maneira a comprovar a influência de um processo físico no outro. O aumento da temperatura muda as características de densidade do ar, gerando o escoamento laminar nas bordas e no topo dos encapsulamentos.

Três linhas foram traçadas ao longo do eixo axial do reator, Figura 4.7 (a), de modo que se pudesse calcular o valor da temperatura e da magnitude de velocidade do ar ao

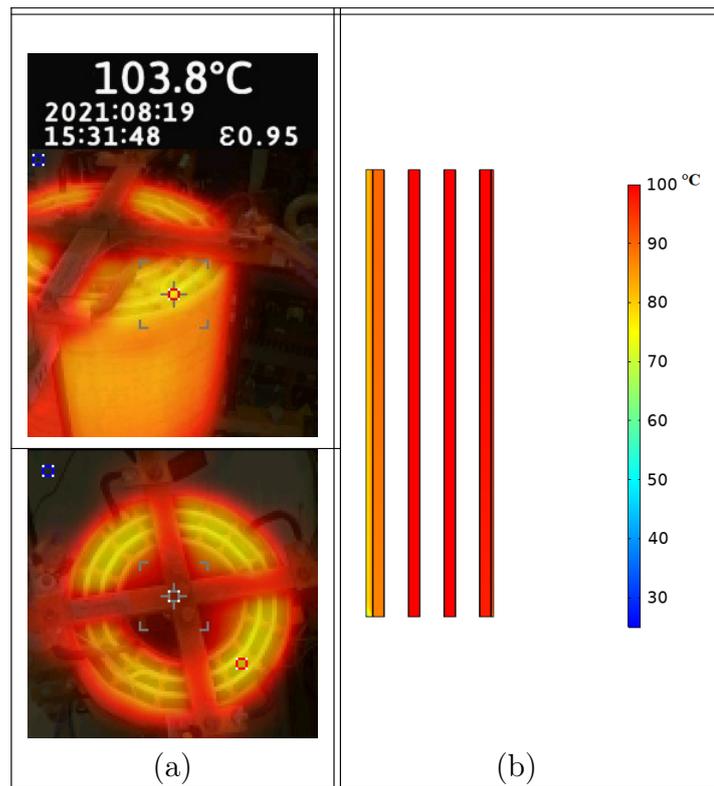


Figura 4.4: Distribuição de temperatura nos encapsulamentos. (a) Medida pelo termo visor. (b) Resultado da simulação.

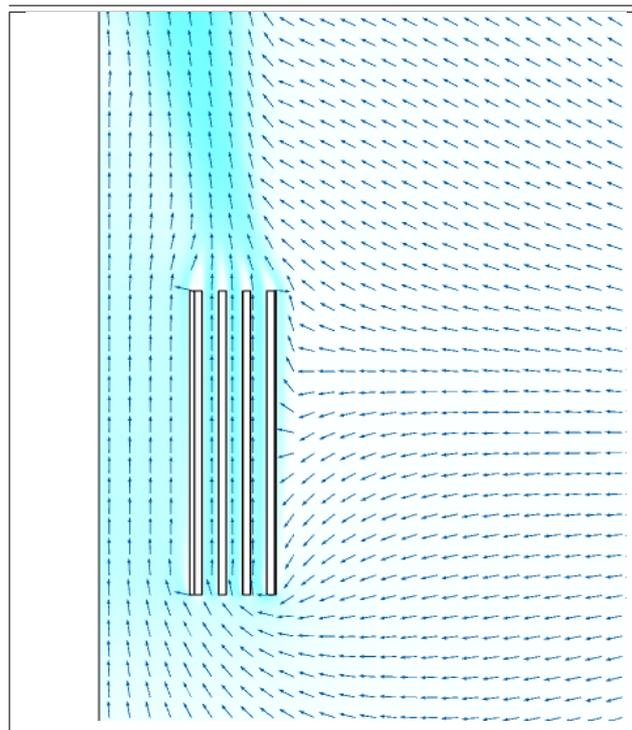


Figura 4.5: Distribuição do fluxo de ar ambiente quando a temperatura é máxima, $t = 10$ min.

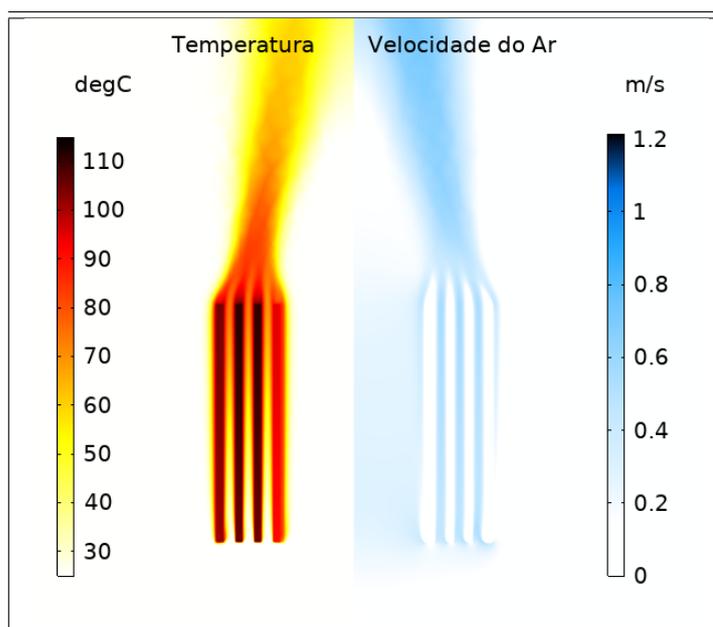


Figura 4.6: Distribuição do campo de temperatura e de velocidade do ar ambiente, $t = 10$ min.

longo delas. A Figura 4.7 (b) comprova que os valores máximos de temperatura ocorrem nos encapsulamentos centrais, da mesma forma que foi medido pelo termo visor, Figura 4.4. Já a Figura 4.7 (c) comprova a velocidade típica estimada, calculada na subseção 3.2.2 e mostrada na Tabela 3.4.

Como esperado, os dutos de ar entre os encapsulamentos apresentam as maiores velocidade do fluido. Essa informação é importante para mostrar como é necessário realizar um projeto térmico e fluidodinâmico adequado para tornar o processo de resfriamento mais eficiente.

A Figura 4.7 (d) mostra mais detalhadamente os valores de magnitude de velocidade do ar ao longo das linhas axiais depois do encapsulamento mais externo. Deste modo, é possível comparar quantitativamente os resultados dessa figura com os valores de distância das camadas limites térmica, externa e de momento, calculadas na subseção 3.2.2 e mostradas na Tabela 3.4.

A camada limite térmica (δ_T), externa (δ) e de momento (δ_M) têm os seguintes valores: 2,9531 mm, 2,470 mm e 2,2594 mm, respectivamente. Esses valores estão próximos aos resultado mostrado na Figura 4.7 (d). Assim, é importante destacar que os números adimensionais de Rayleigh, Reynolds, Grashof e Prandtl, e os resultados das variáveis calculadas a partir deles representam uma estimativa do escoamento do fluxo em questão.

Após comprovar que o escoamento do fluido no entorno do reator é laminar, diferentes

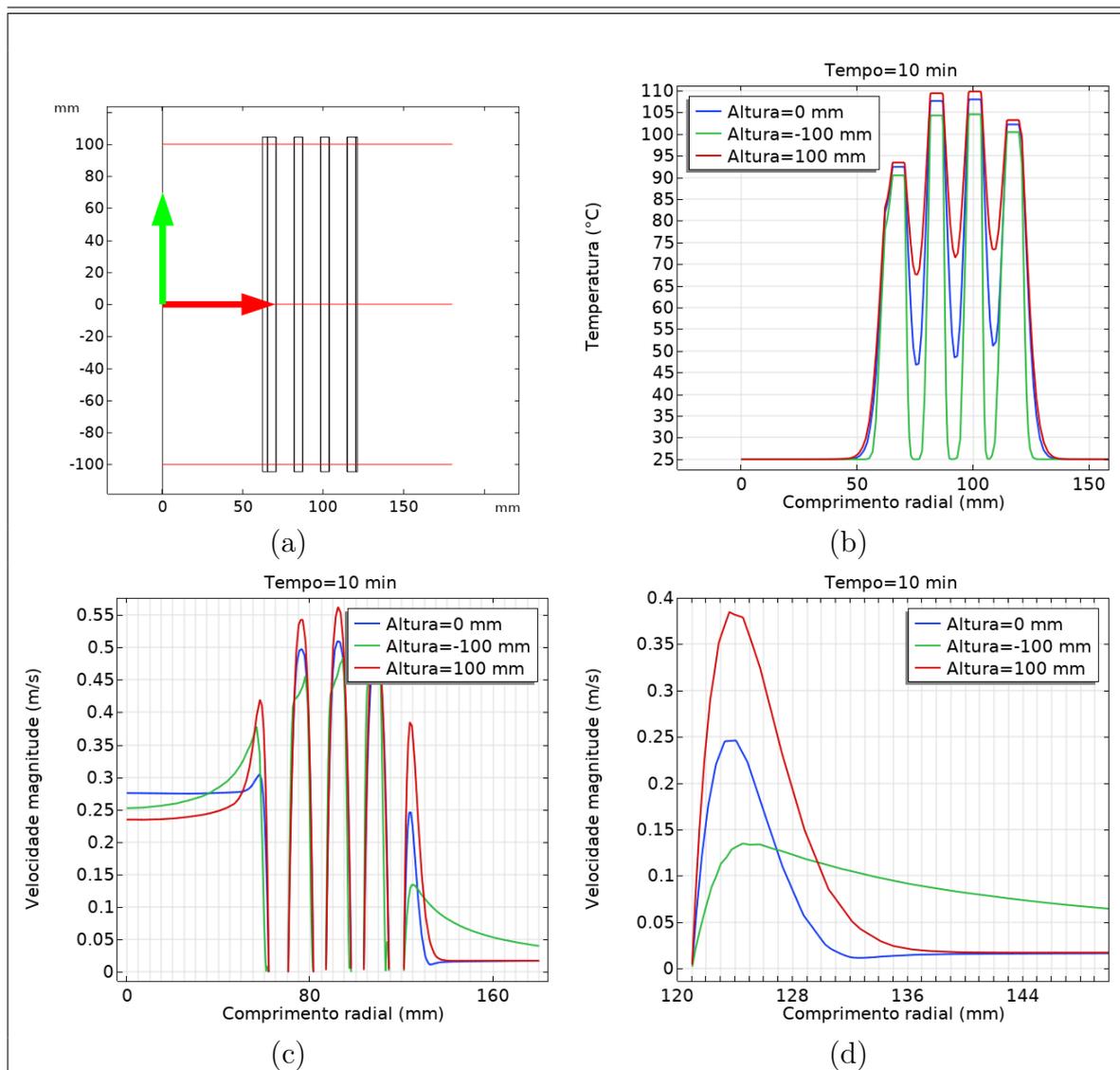


Figura 4.7: (a) Linhas traçadas ao longo do eixo axial. (b) Temperatura ao longo das linhas axiais, $t = 10$ min. (c) Velocidade do ar ao longo das linhas axiais, $t = 10$ min. (d) Velocidade do ar ao longo das linhas axiais depois do encapsulamento mais externo, $t = 10$ min.

valores de correntes alternadas foram empregadas no reator do protótipo laboratorial e a temperatura mensurada através de um termopar do tipo K. Esse ensaio é retratado nas Figuras 3.16 e 3.17 e os resultados com a comparação dos valores medidos e dos valores encontrados pela simulação são mostrados na Figura 4.8.

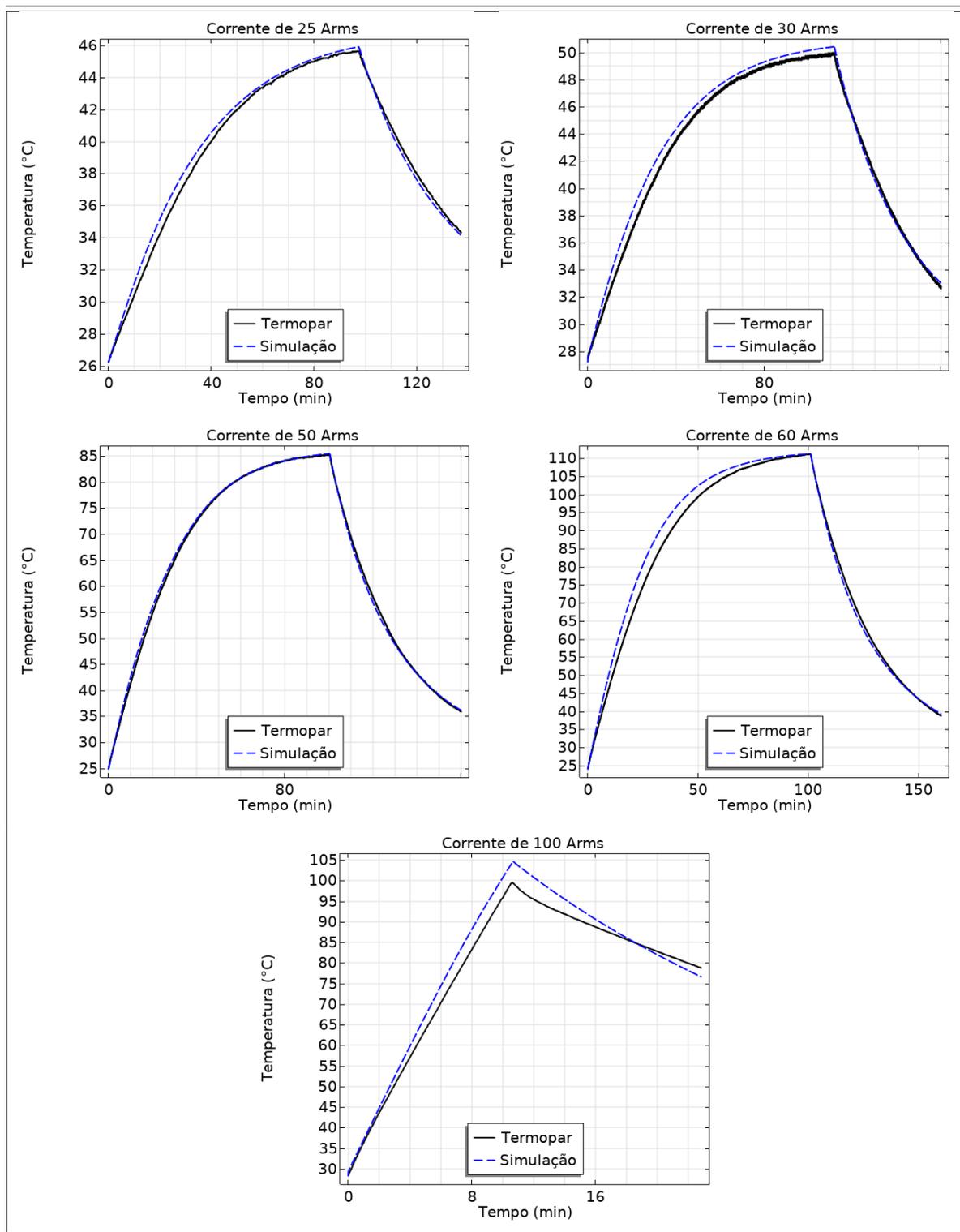


Figura 4.8: Resultados dos ensaios de validação de temperatura no reator do protótipo.

Os resultados encontrados até esse momento comprovam a capacidade do modelo de representar todos os efeitos físicos que possuem influência no processo de aquecimento e resfriamento do reator do protótipo fabricado. A partir desse momento, fundamentado por esses resultados, inicia-se o processo de otimização do reator.

4.2 Otimização e construção

Após validar os modelos eletromagnético, térmico e fluidodinâmico, realizou-se o procedimento de otimização. A Figura 4.9 apresenta um gráfico gerado pela rotina em *python* com a evolução do volume total do reator pelo número de iterações, uma vez que a função objetivo consiste em minimizar esse parâmetro. O algoritmo PSO executou 200 iterações, apresentando um volume final de $1,0097 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. A Figura 4.10 mostra os valores da geometria do reator otimizado encontrados pelo algoritmo PSO e a Tabela 4.2 apresenta a comparação entre as duas geometrias, reator otimizado e reator do protótipo. Nela é possível perceber uma redução de aproximadamente 96,72 % no volume do reator.

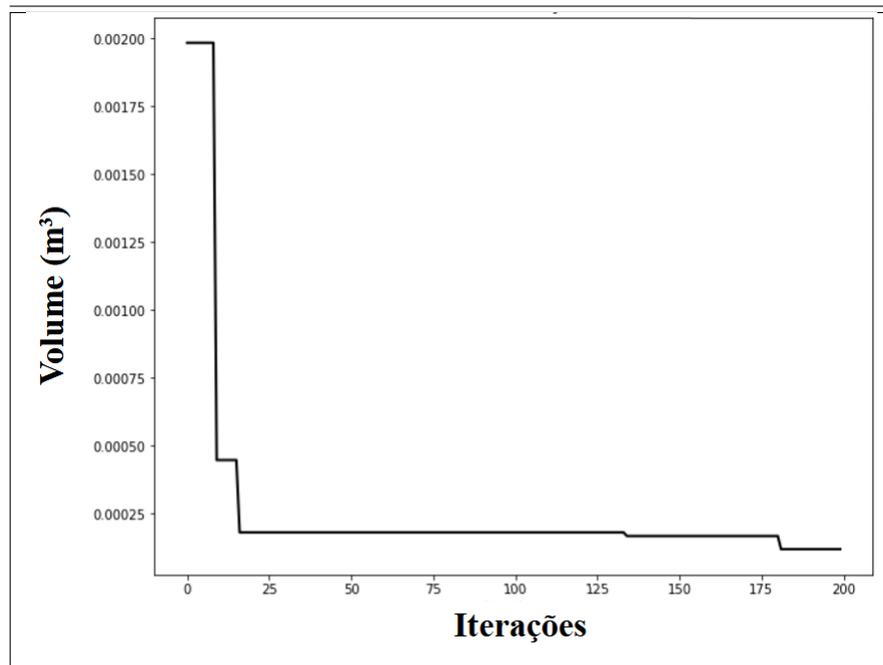


Figura 4.9: Evolução da função objetivo durante as iterações.

O diâmetro do condutor é definido por:

$$d_{condutor} = L_{encapsulamento} - 2 \cdot L_{isolante}, \quad (4.1)$$

sendo que, $L_{encapsulamento} = 1,655 \text{ mm}$ é a espessura total do encapsulamento e $L_{isolante} =$

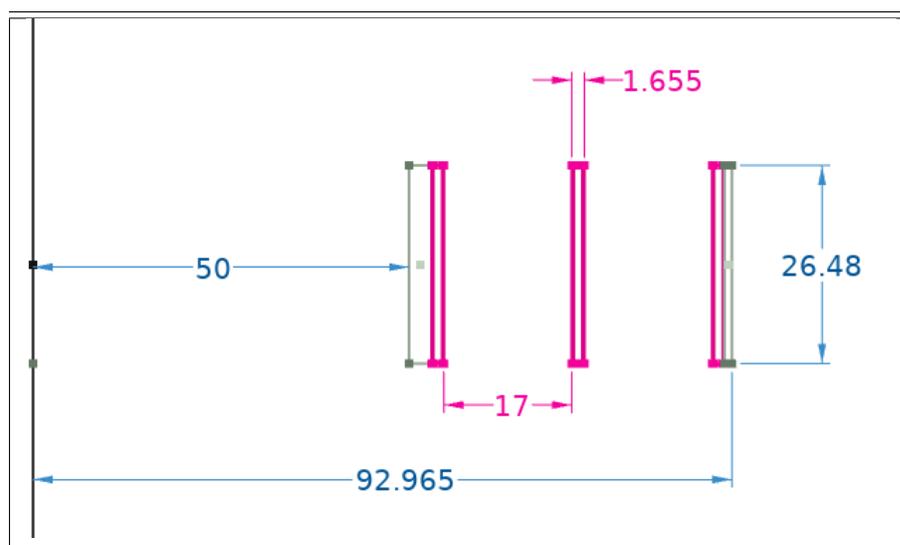


Figura 4.10: Geometria do reator otimizado, em mm.

0,25 mm é a espessura do isolante. Portanto, o diâmetro do condutor é $d_{condutor} = 1,155$ mm. O valor encontrado para o diâmetro do condutor é muito próximo ao valor do diâmetro de um condutor AWG 17. A partir desses resultados a estrutura do reator otimizado foi impressa e montada e os cilindros foram bobinados, como pode ser visto na Figura 4.11. A Figura 4.12 compara o tamanho dos dois reatores, quando colocados lado à lado.

Tabela 4.2: Comparação entre a geometria inicial e a geometria otimizada.

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Otimizado
Número de encapsulamentos	4	3
Número de espiras por encapsulamento	38	16
Largura dos encapsulamentos (mm)	5,5	1,655
Distância entre os encapsulamentos (mm)	11	17
Altura dos encapsulamentos (mm)	209	26,48
Raio interno (mm)	62	50
Raio externo (mm)	121	92,965
Volume (m^3)	$3,0807 \times 10^{-3}$	$1,0097 \times 10^{-4}$

4.3 Testes em bancada

Com o auxílio do medidor de precisão LCR HM8118 da empresa *ROHDE & SCHWARZ* [73], e com o reator otimizado montado, efetuou-se o ensaio para medir a indutância e a resistência do equipamento, Figura 4.13. Conforme pode ser visualizado, a indutância medida é igual a 382,22 μH e a resistência é igual a 832,20 $\text{m}\Omega$. Logo a impedância do reator pode ser facilmente calculada:

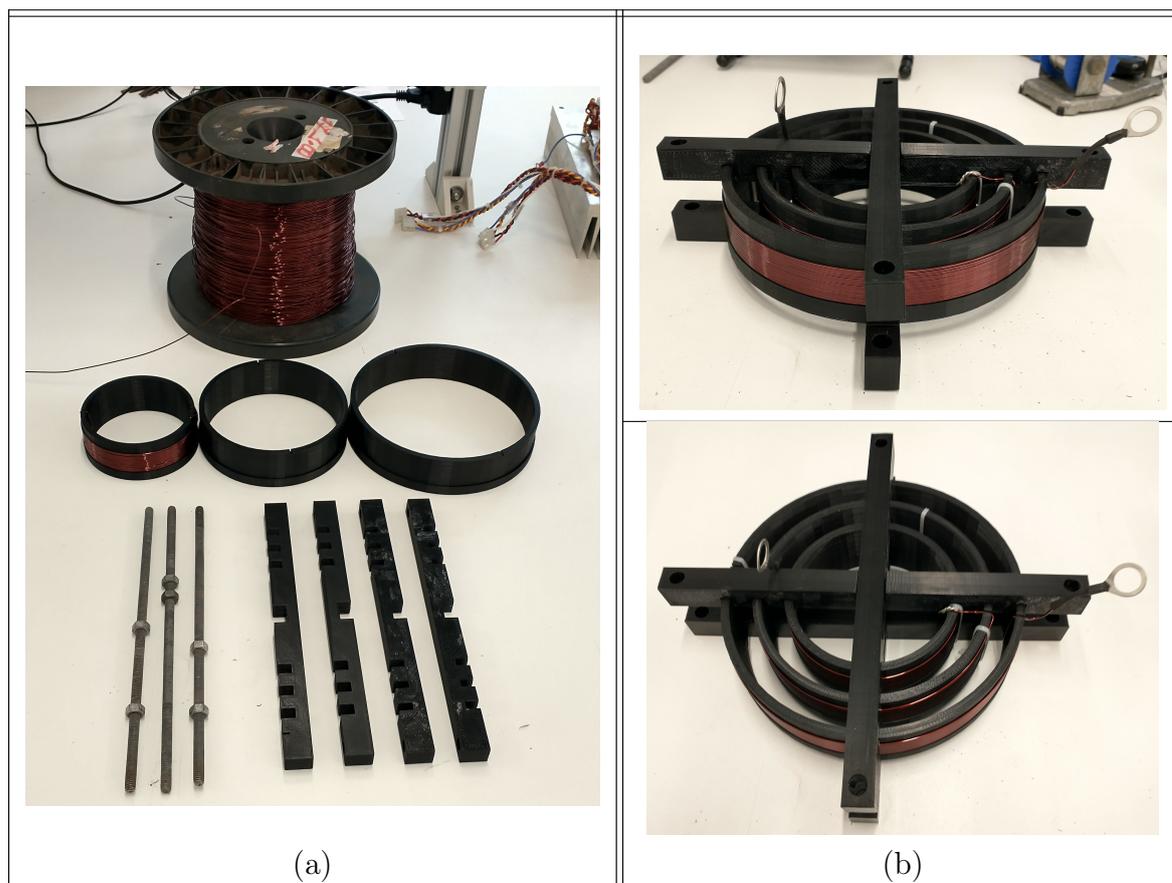


Figura 4.11: Reator otimizado. (a) Peças utilizadas. (b) Reator montado, vista lateral e superior.



Figura 4.12: Comparação entre o reator do protótipo e o reator otimizado.

$$X_r = 2\pi fl_r \text{ e } Z_r = \sqrt{R_r^2 + X_r^2}, \quad (4.2)$$

sendo $f = 60$ Hz, tem-se que $Z_r = 0,8446 \Omega$.

Como mencionado na seção 3.3, uma das restrições da otimização era que a solução final tivesse uma impedância em torno de $0,72 \leq Z_r \leq 0,88$. Portanto, o reator construído está dentro dessa primeira restrição. A segunda restrição é relativo à temperatura, no qual o reator não pode passar de 50 °C durante a aplicação da dez ciclos da corrente de curto circuito, sabendo-se que a tensão de linha do sistema é igual à $220 V_{rms}$.

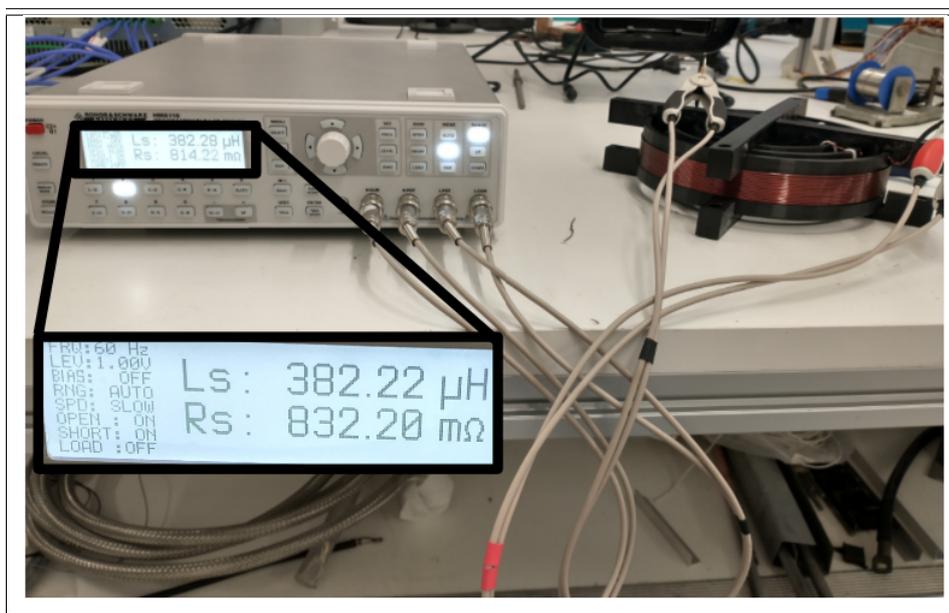


Figura 4.13: Ensaio de medição dos parâmetros elétricos do reator otimizado.

A corrente de regime permanente, $I_r = 4,95 A_{rms}$, foi aplicada no reator durante 40 min, de maneira que se pudesse entender o seu processo de aquecimento em regime permanente antes da ocorrência de um curto circuito. A Figura 4.14 mostra a bancada e os equipamentos utilizados para a realização dos testes finais de corrente e temperatura.

A Figura 4.15 mostra o resultado quando a corrente de regime permanente, $I_r = 4,95 A_{rms}$, é empregada nos terminais do reator. Nela percebe-se que, no início, o reator está em equilíbrio com a temperatura ambiente, aproximadamente 29 °C. Após 30 minutos de ensaio, a temperatura no reator tende ao estado estacionário, aproximadamente 44 °C.

Já a Figura 4.16 mostra o resultado do primeiro ensaio de curto. Após o reator atingir a temperatura de regime permanente (temperatura de trabalho), 44 °C, uma corrente de curto-circuito com valor de $100 A_{rms}$ e dez ciclos é aplicada pela fonte controlada. A Figura 4.16 (a) apresenta o perfil da corrente de curto e (b) os valores de temperatura.

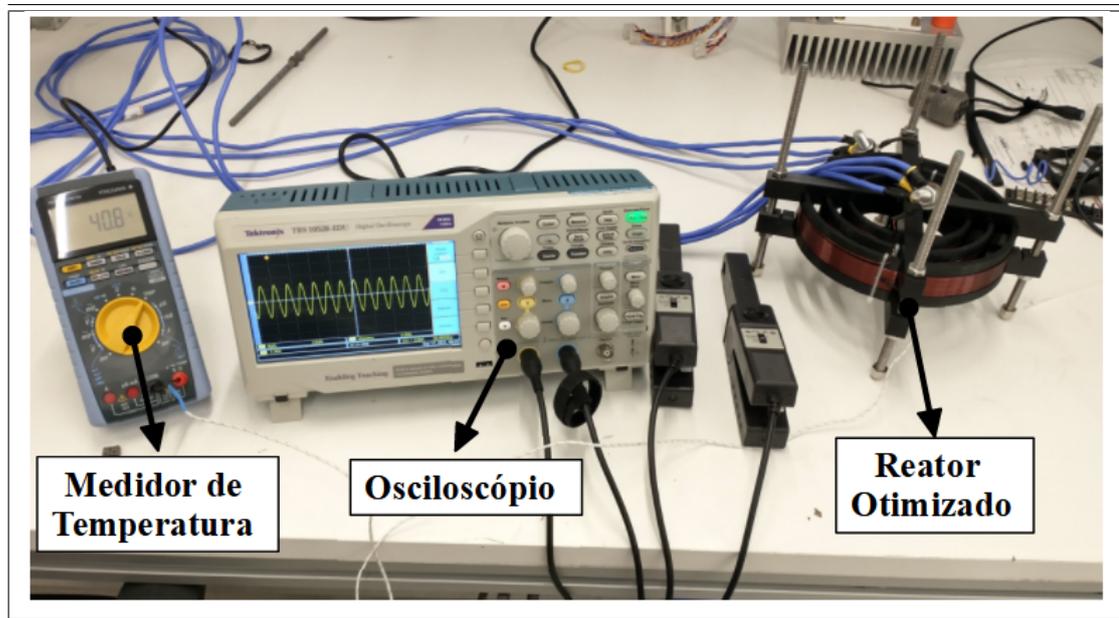


Figura 4.14: Bancada para testes de corrente e temperatura no reator otimizado.

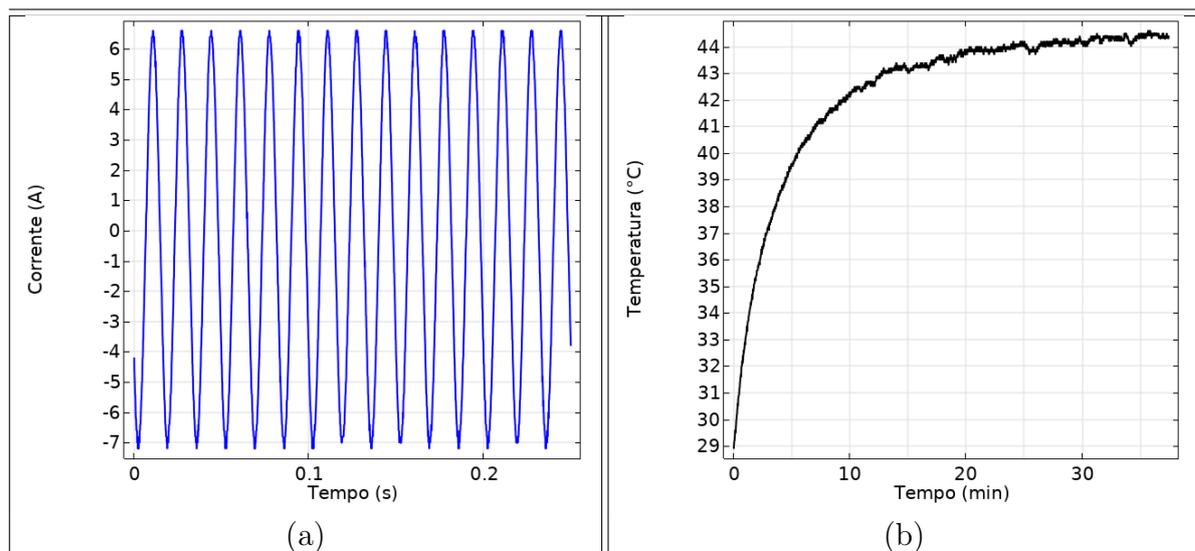


Figura 4.15: Temperatura medida quando uma corrente de $4,95 A_{rms}$ é aplicada durante 40 minutos.

Na Figura 4.16 percebe-se que durante o período de curto circuito, a temperatura do reator altera-se quase que de forma instantânea de 44°C para $49,5^{\circ}\text{C}$. Apesar dessa brusca variação, a temperatura se aproxima, mas em nenhum momento ultrapassa o limite definido na otimização, 50°C . É importante destacar também que a temperatura inicial do reator é de 44°C , 4°C acima da temperatura ambiente usada no estudo de otimização.

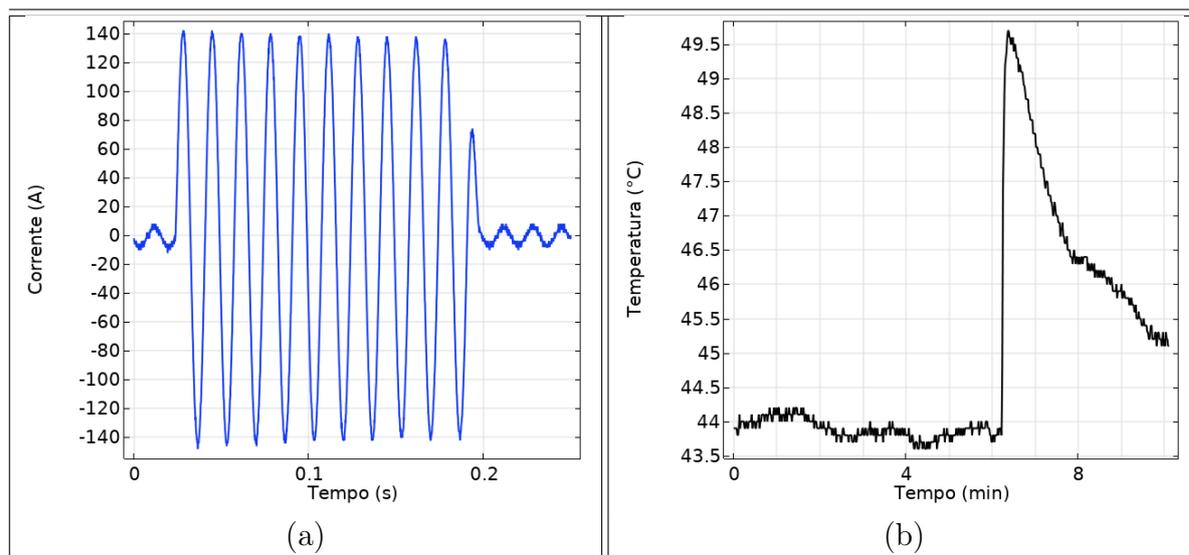


Figura 4.16: Temperatura medida durante o primeiro ensaio de curto-circuito.

Com o intuito de colocar à prova a capacidade do reator otimizado, dois ensaios com situações mais extremas que aquelas empregadas inicialmente no estudo de otimização foram realizados. O primeiro, Figura 4.17, consistiu na aplicação da corrente de curto definida anteriormente, mas, neste caso, o reator era alimentado pela corrente nominal e três correntes de curto com duração de 10 ciclos cada, foram aplicadas. Elas possuem uma defasagem de 1 segundo de uma para a outra. Esse ensaio teve como princípio simular o mesmo cenário que o reator estaria exposto em uma subestação quando em série com o religador. Já o segundo ensaio, Figura 4.18, consistiu em aplicar uma corrente de curto pelo dobro de tempo, 20 ciclos.

Em ambos os ensaios a temperatura final do reator ultrapassou o limite de 50°C empregado como uma das restrições no estudo de otimização. Contudo, é importante ressaltar que nenhuma dessas situações foram previstas no estudo de otimização. Mesmo a temperatura final do condutor tendo ultrapassado o limite de 50°C nos ensaios, ela continua bem abaixo da temperatura máxima que, geralmente, tais condutores esmaltados com isolamento classe A suportam, 105°C .

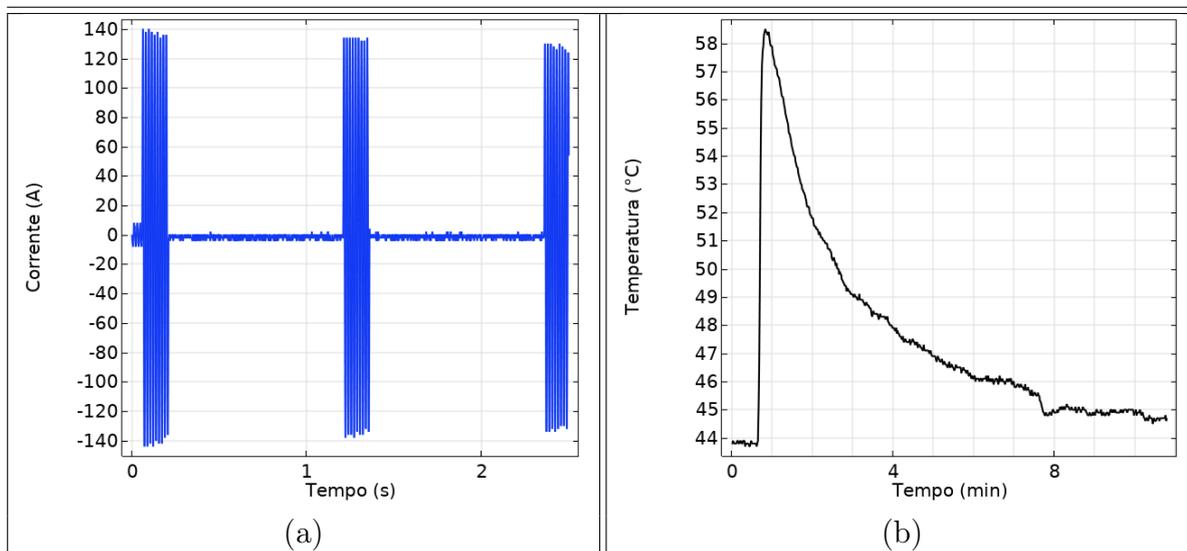


Figura 4.17: Temperatura medida durante o segundo ensaio de curto-circuito.

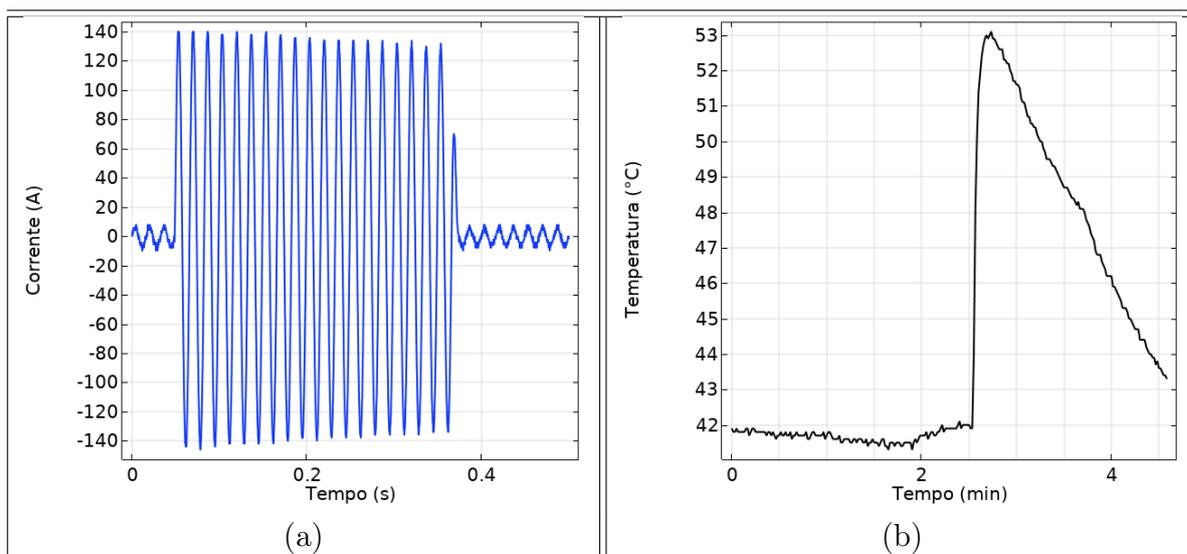


Figura 4.18: Temperatura medida durante o terceiro ensaio de curto-circuito.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho inicialmente discute uma das principais adversidades contemporâneas enfrentadas pelas distribuidoras de energia elétrica, as correntes de curto-circuitos. O aumento da demanda somado a outros fatores têm provocado um aumento acentuado nos valores de amplitude de tais correntes. Uma vez que, os sistemas de proteção de muitas subestações já encontram-se obsoletos, esse fenômeno tem influenciado para um aumento considerável no número de interrupções do fornecimento de energia elétrica e, nos piores casos, a queima e perda total de muitos equipamentos.

Nesse contexto o LCC-SC surge com uma das principais soluções. Assim, motivado pelo projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica que tem como objetivo a construção de um LCC-SC, o reator com núcleo de ar do protótipo laboratorial de baixa tensão, instalado no próprio laboratório, foi o principal objeto de estudo deste trabalho.

Nesse tipo de equipamento, o regime de trabalho dos reatores muda completamente, tonando-se intermitente. A corrente apenas passará através deles quando uma falha ocorrer no sistema e as chaves semicondutoras pararem de conduzir. Nessas circunstâncias, o reator não mais precisa suportar a corrente nominal do sistema, ele apenas precisa suportar as correntes dinâmica e térmica de curto, definidas na seção 3.1, até que as chaves voltem a conduzir. Essas correntes, normalmente, duram poucos ciclos, assim esses reatores podem ser otimizados e terem seu volume total e preço de fabricação reduzidos consideravelmente.

Através da junção do Método de Elementos Finitos e do algoritmo PSO, o primeiro responsável por modelar todos os processos físicos que atuam sobre os reatores com núcleo de ar durante o seu funcionamento, já o segundo responsável por minimizar o volume do

reator e de condutor utilizado levando em consideração as novas premissas de atuação desses equipamentos, conseguiu-se reduzir aproximadamente 96,72 % do volume total do reator com núcleo de ar. Esse resultado foi ocasionado, principalmente, pela substituição do condutor de seção retangular com 5 mm de largura no reator do protótipo pelo condutor de seção circular com 1,155 mm de diâmetro (AWG 17) no reator otimizado.

Fios esmaltados, normalmente, são vendidos à quilo. Por isso, a substituição do tipo de condutor representou uma diferença no peso de 5,43 kg no reator do protótipo para 90,24 g no reator otimizado. Esse resultado é muito expressivo e mostra como essa metodologia de otimização conseguiu reduzir o volume, o peso e, principalmente, o custo desse tipo de reator com núcleo de ar. A redução do custo é crucial para ajudar os fabricantes a tornarem o LCC-SC um equipamento comercialmente viável. A redução do peso e do volume, além de ajudar as concessionárias de energia a instalarem o equipamento em suas subestações que muitas vezes possuem pouco espaço, também reduz a poluição eletromagnética que esses reatores produzem no seu entorno.

É válido destacar que a metodologia de otimização apresentada neste trabalho pode ser aplicada em outros equipamentos, com diferentes restrições e funções objetivo. Desde que, a modelagem destes equipamentos esteja englobada nos conceitos físicos apresentados. É importante mencionar, também, que esse estudo de otimização foi realizado em um protótipo laboratorial de baixa tensão, logo desafios ainda maiores serão encontrados nos equipamentos projetados para atuar sob as tensões utilizadas nas subestações elétricas, por exemplo 13,8 kV.

5.1 Trabalhos Futuros

A partir do estudo desenvolvido neste trabalho, alguns tópicos de pesquisas futuras puderam ser observados a fim de dar prosseguimento ao conhecimento adquirido a cerca do tema, como:

- Estudar os esforços mecânicos durante a passagem da corrente de curto-circuito pelo reator otimizado. Deste modo, investigando possíveis melhoras a se realizar na sua estrutura;
- Modelar e ensaiar o banco trifásico de reatores, quando estes estão simultaneamente conectados à rede elétrica. Com isso, entender a influência de um reator no outro durante a passagem da corrente de curto-circuito;

-
- Confrontar o algoritmo de otimização PSO com outros métodos utilizados na literatura, procurando qual se adéqua melhor a problemática;
 - Estudar a aplicação dessa metodologia de validação e otimização dos reatores com núcleo de ar em um equipamento projetado para tensões maiores, por exemplo 13,8 kV.

Referências

- [1] AMON, J.; FERNÁNDEZ, P. C.; ROSE, E. H.; AJUZ, A. D. ; CASTA-NHEIRA, A. M. P. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation. 2005. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Brazilian-Successful-Experience-in-the-Usage-of-for-Amon-Fern>>.
- [2] ENERGÉTICA, E. de P. *Anuário Interativo*. jan. 2022. Disponível em: <<http://www.http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/>>.
- [3] ALAM, M.; ABIDO, M.; EL-AMIN, I. Fault Current Limiters in Power Systems: A Comprehensive Review. *Energies*, v. 11, n. 5, p. 1025, abr. 2018. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1025>>.
- [4] ZHOU, H.; YUAN, J.; CHEN, F.; CHEN, B. Inductive Fault Current Limiters in VSC-HVDC Systems: A Review. *IEEE Access*, v. 8, p. 38185–38197, 2020. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9007651/>>.
- [5] REZAAE, M.; HARLEY, R. G. Resonance-Based Fault Current Limiters: Theory, Applications, and Assessment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 4, p. 3066–3076, jul. 2018. ISSN 0093-9994, 1939-9367. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8320820/>>.
- [6] AHMED, M.; PUTRUS, G.; RAN, L.; PENLINGTON, R. Development of a Prototype Solid-State Fault-Current Limiting and Interrupting Device for Low-Voltage Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 4, p. 1997–2005, out. 2006. ISSN 0885-8977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1705560/>>.
- [7] ADAPA, R.; PICCONE, D. *Solid-State Fault Current Limiter Development : Design and Testing Update of a 15kV SSCL Power Stack*. [S.l.], abr. 2012. DOE/CH/11354, 1043100 p. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/1043100/>>.
- [8] Trench Groups. *AIR CORE SHUNT REACTORS*. ago. 2020. Disponível em: <<https://www.trench-group.com/products/air-core-shunt-reactors/>>.
- [9] General Electric. *HV/MV Equipment Reactors*. ago. 2020. Disponível em: <https://www.gegridsolutions.com/hvmv_equipement/catalog/reactors.htm>.
- [10] FILHO, J. A.; HARTUNG, K.-H. Aplicação de Novas Técnicas de Limitação de Curto-Circuito Face à Conexão de Produtores Independentes à Rede Básica Sob o Novo Ambiente Desregulamentado do Setor Elétrico Brasileiro. *Anais do XVI SNPTEE*, p. 59, out. 2001.

- [11] ADELCO. *Parceria Adelco x UFF*. jan. 2022. Disponível em: <https://www.adelco.com.br/pt_br/2021/01/20/parceria-adelco-x-uff/>.
- [12] UEDA, T.; MORITA, M.; ARITA, H.; KIDA, Y.; KUROSAWA, Y.; YAMAGIWA, T. Solid-state current limiter for power distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 4, p. 1796–1801, out. 1993. ISSN 08858977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/248287/>>.
- [13] RADMANESH, H.; FATHI, S. H.; GHAREHPETIAN, G. B.; HEIDARY, A. Bridge-Type Solid-State Fault Current Limiter Based on AC/DC Reactor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 1, p. 200–209, fev. 2016. ISSN 0885-8977, 1937-4208. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7279159/>>.
- [14] Karthigha.D; Sathiya.K; Nirmala.S. Solid State Fault Current Limiter for Improvement of Smart Grid Performance. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 4, n. 8, p. 2028–2031, 2017. ISSN 2395-0056. Disponível em: <<https://www.irjet.net/archives/V4/i8/IRJET-V4I8366.pdf>>.
- [15] DALAL, S. B.; KNUTH, W.; GAUN, A.; GRISENTI, A. Fault Current Mitigation Using 550kV Air Core Reactors. In: *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. Denver, CO: IEEE, 2018. p. 1–9. ISBN 978-1-5386-5583-2. Relevante. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1dyLXwqpkDflq8Sm7aeHhN5c4Nk8mCnd/view?usp=sharing>>.
- [16] KIERSTEAD, F. H.; STEPHENS, H. O. Current-Limiting Reactors Their Design, Installation and Operation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XLIII, p. 902–913, jan. 1924. ISSN 0096-3860, 2330-9431. Válido.
- [17] PAPP, K.; SHARP, M. R.; PEELO, D. F. High voltage dry-type air-core shunt reactors. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, v. 131, n. 8, p. 349–354, dez. 2014. ISSN 0932-383X, 1613-7620. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00502-014-0232-y>>.
- [18] COMISSION, U. o. C. I. C. E. *Development of Fault Current Controller Technology - Prototyping, Laboratory Testing, and Field Demonstration*. [S.l.], jun. 2011. Disponível em: <<https://uc-ciee.org/ciee-old/downloads/FaultCurrentController.pdf>>.
- [19] OLSEN, T. *Anatomy of a short circuit*. jan. 2022. Disponível em: <<https://new.siemens.com/us/en/products/energy/product-support/t-d-guardian-articles/anatomy-of-a-short-circuit.html>>.
- [20] BOYLESTAD, R. L. *Introdução à análise de circuitos*. 12^a. ed. [S.l.]: Pearson Educação, 2011.
- [21] BITENCOURT, A. D. A. *ANALISE TECNICA DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DE ESTADO SOLIDO*. Tese (Tese de Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ., 2020.
- [22] BARZEGAR-BAFROOEI, M. R.; FOROUD, A. A.; ASHKEZARI, J. D.; NIASATI, M. On the advance of SFCL: a comprehensive review. *IET Generation, Transmission*

- Electric Distribution*, v. 13, n. 17, p. 3745–3759, set. 2019. ISSN 1751-8695, 1751-8695. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-gtd.2018.6842>>.
- [23] ELECTRIC, G. *A G&W Electric apresenta o Protetor Limitador de Corrente CLiP®-LV para Aplicações a 750VCA*. jan. 2022. Disponível em: <<https://pt.gwelectric.com/news/gw-introduces-clip-lv-current-limiting-protector-for-applications-to-750vac/>>.
- [24] LIU, C.; WU, Y.; SU, Y.; WEI, Y.; SHI, B.; LAI, S. 66kV Phase-controlled Reactor Fault Analysis. *China International Conference on Electricity Distribution*, p. 4, 2018.
- [25] NIE, H.; LIU, X.; WANG, Y.; YAO, Y.; GU, Z.; ZHANG, C. Breaking Overvoltage of Dry-Type Air-Core Shunt Reactors and its Cumulative Effect on the Interturn Insulation. *IEEE Access*, v. 7, p. 55707–55720, 2019. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8701580/>>.
- [26] XIE, X.; ZHANG, J.; TAO, S.; XU, M.; LI, F.; HANG, Y.; ZHANG, L.; TANG, H.; MIAO, H.; LI, Y. Common accidents and precautions of Dry-type Air-core reactors. In: *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2017)*. Beijing, China: Atlantis Press, 2017. ISBN 978-94-6252-318-0. Disponível em: <<http://www.atlantispress.com/php/paper-details.php?id=25873749>>.
- [27] YANG, J.; ZHANG, W.; ZOU, L.; WANG, Y.; SUN, Y.; FENG, Y. Research on Distribution and Shielding of Spatial Magnetic Field of a DC Air Core Smoothing Reactor. *Energies*, v. 12, n. 5, p. 937, jan. 2019. Number: 5 Relevante.
- [28] STEMMLE, M.; MERSCHEL, F.; NOE, M.; HOBL, A. AmpaCity — Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply. In: *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 978-1-4799-3656-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6863566/>>.
- [29] HONG, Z.; SHENG, J.; ZHANG, J.; LIN, B.; YING, L.; LI, Y.; JIN, Z. The Development and Performance Test of a 10 kV Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, p. 5600504–5600504, jun. 2012. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6108352/>>.
- [30] HOBL, A.; GOLDACKER, W.; DUTOIT, B.; MARTINI, L.; PETERMANN, A.; TIXADOR, P. Design and Production of the ECCOFLOW Resistive Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, p. 5601804–5601804, jun. 2013. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6407807/>>.
- [31] KOZAK, J.; MAJKA, M.; KOZAK, S.; JANOWSKI, T. Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, p. 5601804–5601804, jun. 2012. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6099577/>>.

- [32] HELLMANN, S.; ABPLANALP, M.; HOFSTETTER, L.; NOE, M. Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer With Recovery-Under-Load Capabilities. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 1–5, jun. 2017. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7815315/>>.
- [33] HAYAKAWA, N.; KOJIMA, H.; HANAI, M.; OKUBO, H. Progress in Development of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT). *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, p. 1397–1400, jun. 2011. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5643133/>>.
- [34] Yin Xin; GONG, W.; NIU, X.; GAO, Y.; GUO, Q.; XIAO, L.; CAO, Z.; HONG, H.; WU, A.; LI, Z.; HU, X.; TIAN, B.; ZHANG, J.; HE, Y.; WANG, Y.; CUI, J.; DING, S.; WANG, J.; REN, A.; YE, F. Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, p. 1934–1937, jun. 2009. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5067183/>>.
- [35] XIN, Y.; GONG, W. Z.; SUN, Y. W.; CUI, J. B.; HONG, H.; NIU, X. Y.; WANG, H. Z.; WANG, L. Z.; LI, Q.; ZHANG, J. Y.; WEI, Z. Q.; LIU, L.; YANG, H.; ZHU, X. H. Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, p. 5602305–5602305, jun. 2013. ISSN 1051-8223, 1558-2515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6384705/>>.
- [36] MORICONI, F.; ROSA, F. D. L.; SINGH, A.; CHEN, B.; LEVITSKAYA, M.; NELSON, A. An innovative compact saturable-core HTS Fault Current Limiter - development, testing and application to transmission class networks. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN: IEEE, 2010. p. 1–8. ISBN 978-1-4244-6549-1. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5590090/>>.
- [37] FENG, Y.; JOHNSON, E.; SAADEH, O.; BALDA, J. C.; MANTOOTH, H. A.; SCHUPBACH, M. Impact of solid-state fault current limiters on protection equipment in transmission and distribution systems. In: *IEEE PES T&D 2010*. New Orleans, LA: IEEE, 2010. p. 1–6. ISBN 978-1-4244-6546-0 978-1-4244-6548-4. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5484242/>>.
- [38] MEYER, C.; KOLLENSPERGER, P.; DONCKER, R. D. Design of a novel low loss fault current limiter for medium-voltage systems. In: *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04*. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2004. v. 3, p. 1825–1831. ISBN 978-0-7803-8269-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1296114/>>.
- [39] SA'ED, J. A.; QURAAN, M.; ABU-KHAIZARAN, M.; FAVUZZA, S.; MASSARO, F. Control of solid-state fault current limiter for DG-integrated distribution systems. In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Milan, Italy: IEEE, 2017. p. 1–5. ISBN 978-1-5386-3917-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7977785/>>.

- [40] ADELCO. *ADELCO*. jan. 2022. Disponível em: <<https://www.adelco.com.br/pt,r/transformadores-reatores/>>.
- [41] Prysmian Group. *Condutor de cobre ou alumínio: qual é o melhor?* ago. 2020. Disponível em: <<https://br.prysmiangroup.com/>>.
- [42] POKHAREL, S.; DIMITROVSKI, A. Analytical Modeling of A Ferromagnetic Core Reactor. In: *2019 North American Power Symposium (NAPS)*. Wichita, KS, USA: IEEE, 2019. p. 1–6. ISBN 978-1-72810-407-2. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9000352/>>.
- [43] CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. p. 698.
- [44] Selected Magnetic Steel Data. In: SUDHOFF, S. D. (Ed.). *Power Magnetic Devices*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014. p. 443–444. ISBN 978-1-118-82460-3 978-1-118-48999-4. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118824603.app3>>.
- [45] ANAGHA, E.; SELVARAJ, S. Prediction of Core Loss and Temperature in Gapped Core Shunt Reactors Using Reluctance Network. In: *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. Vellore, India: IEEE, 2019. p. 1–5. ISBN 978-1-5386-8190-9. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8960166/>>.
- [46] Get The Best of Energy. *Oil immersed Short Circuit Limiting Reactors*. ago. 2020. Disponível em: <<https://www.gbeonline.com/en/oil-immersed-short-circuit-limiting-reactors/>>.
- [47] LORENCINE. *Características construtivas dos transformadores de potência*. jan. 2022. Disponível em: <<https://www.lorencini.com.br/blog/caracteristicas-construtivas-dos-transformadores-de-potencia/>>.
- [48] HAN, Z.; ZOU, L.; SONG, H.; ZHAO, T.; GONG, P. Study on models simplification of magnetic field around dry-type air-core reactors. In: *2017 China International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. [s.n.], 2017. p. 446–450. Principal. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/17KeCsDif4uOeCnQoap2T1rHh21in_uj/view?usp=sharing>.
- [49] WENBIAO, T.; JINHAO, W.; ZHENGUO, M.; WEINAN, D.; WEI, W. Research for shielding effect of three-phase air-core reactors in substation by using different materials. *The Journal of Engineering*, v. 2019, n. 16, p. 1214–1216, mar. 2019. ISSN 2051-3305, 2051-3305. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/joe.2018.8755>>.
- [50] CAVERLY, D. C.; POINTNER, K.; PRESTA, R.; GRIEBLER, P.; REISINGER, H.; DRIVE, M. Air Core Reactors : Magnetic Clearances , Electrical Connection , and Grounding of their Supports. In: . [s.n.], 2017. Principal. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1UGsJJoUXYcUmaYPvvYjX_ljn9L3cDyYR/view?usp=sharing>.
- [51] YUAN, Z.; HE, J.-j.; PAN, Y.; YIN, X.-g.; DING, C.; NING, S.-f.; LI, H.-l. Thermal Analysis of Air-Core Power Reactors. *ISRN Mechanical Engineering*, v. 2013, p. 1–6, 2013. ISSN 2090-5130. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/archive/2013/865015/>>.

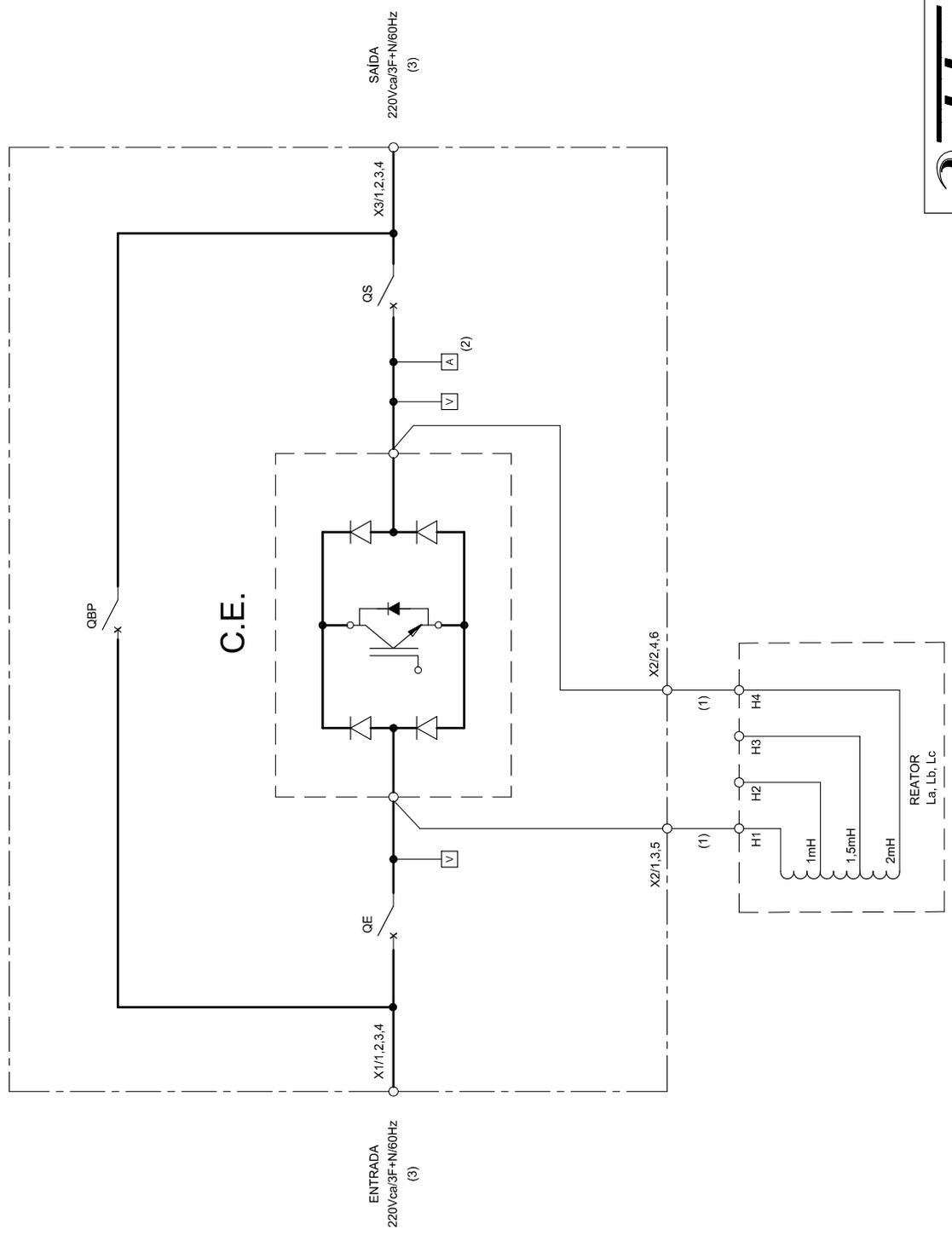
- [52] YUAN, F. T.; YUAN, Z.; LIU, J. X.; WANG, Y.; MO, W. X.; HE, J. J. Research on temperature field simulation of dry type air core reactor. In: *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Sydney, Australia: IEEE, 2017. p. 1–5. ISBN 978-1-5386-3246-8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8055923/>>.
- [53] ANTONOV, A. S.; GLUSHKOV, D. A. Research on electromagnetic and heat processes in dry type air core current-limiting reactors. In: *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2017. p. 1471–1476. ISBN 978-1-5090-4865-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7910852/>>.
- [54] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. *Electric machinery*. 6th ed. ed. Boston, Mass: McGraw-Hill, 2003. (McGraw-Hill series in electrical engineering). ISBN 978-0-07-366009-7 978-0-07-112193-4.
- [55] YUAN, F.; WU, K.; YUAN, Z.; LIU, J.; DING, C.; WANG, Y.; HE, J. Thermal Optimization for Dry Type Air Core Reactor Base on FEM. In: *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Jeju: IEEE, 2018. p. 1726–1730. ISBN 978-89-86510-20-1. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8549257/>>.
- [56] BEJAN, A.; KRAUS, A. D. *Heat transfer handbook*. New York: J. Wiley, 2003. ISBN 978-0-471-39015-2.
- [57] DAVIDSON, P. A. *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. Second edition. Oxford, United Kingdom ; New York, NY, United States of America: Oxford University Press, 2015. OCLC: ocn911091654. ISBN 978-0-19-872258-8 978-0-19-872259-5.
- [58] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007. OCLC: ocm62532755. ISBN 978-0-471-45728-2.
- [59] SADIKU, M. N. O. *Computational electromagnetics with MATLAB®*. Fourth edition. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 978-1-138-55815-1.
- [60] ENGENHARIA, E. soluções em. *Serviços de Consultoria*. jan. 2022. Disponível em: <https://electromagnetics.com.br/servicos>.
- [61] COLEY, D. A. *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers*. WORLD SCIENTIFIC, 1999. ISBN 978-981-02-3602-1 978-981-238-635-9. Disponível em: <<https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/3904>>.
- [62] EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, Japan: IEEE, 1995. p. 39–43. ISBN 978-0-7803-2676-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/494215/>>.
- [63] COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems Second Edition*. p. 810.

- [64] YIQING, L.; XIGANG, Y.; YONGJIAN, L. An improved PSO algorithm for solving non-convex NLP/MINLP problems with equality constraints. *Computers & Chemical Engineering*, v. 31, n. 3, p. 153–162, jan. 2007. ISSN 00981354. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098135406001281>>.
- [65] WANG, D.; TAN, D.; LIU, L. Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*, v. 22, n. 2, p. 387–408, jan. 2018. ISSN 1432-7643, 1433-7479. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00500-016-2474-6>>.
- [66] YUAN, F.; YUAN, Z.; WANG, Y.; LIU, J.; SU, H.; HE, J. Research of electromagnetic and thermal optimization design on air core reactor. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, v. 13, n. 5, p. 725–731, 2018. ISSN 1931-4981. Relevante. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1w6IrkvMJOFFt57A9ADQS4TCKOypSsKY/view?usp=sharing>>.
- [67] PACIFIC. *PACIFIC Power Source*. fev. 2022. Disponível em: <<https://pacificpower.com/products/afx-series/products-afx-overview>>.
- [68] YOKOGAWA. *Digital Multimeter TY720*. fev. 2022. Disponível em: <https://tmi.yokogawa.com/br/solutions/products/portable-and-bench-instruments/digital-multimeters/ty720-digital-multimeter/Documentos-e-Downloads_downloads6>.
- [69] FLUKE. *Termômetro de IR Fluke VT04 Visual*. fev. 2022. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/medicao-de-temperatura/termometros-ir/vt04>>.
- [70] MIRANDA, L. J. V. PySwarms: a research toolkit for Particle Swarm Optimization in Python. *The Journal of Open Source Software*, v. 3, n. 21, p. 433, jan. 2018. ISSN 2475-9066. Disponível em: <<http://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00433>>.
- [71] HENNIG, J.; ELFNER, M.; FEDER, J. *MPh-py/MPh: MPh 1.0.4*. Zenodo, maio 2021. Disponível em: <<https://zenodo.org/record/4782316>>.
- [72] GTMAX3D. *GTMAX3D*. fev. 2022. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-a3-simplify3d>>.
- [73] SCHWARZ, R. . *Produtos*. set. 2022. Disponível em: <<https://www.rohde-schwarz.com/br/produtos/teste-e-medicao/medidores-de-lcr/rs-hm811863493-44101.html>>.

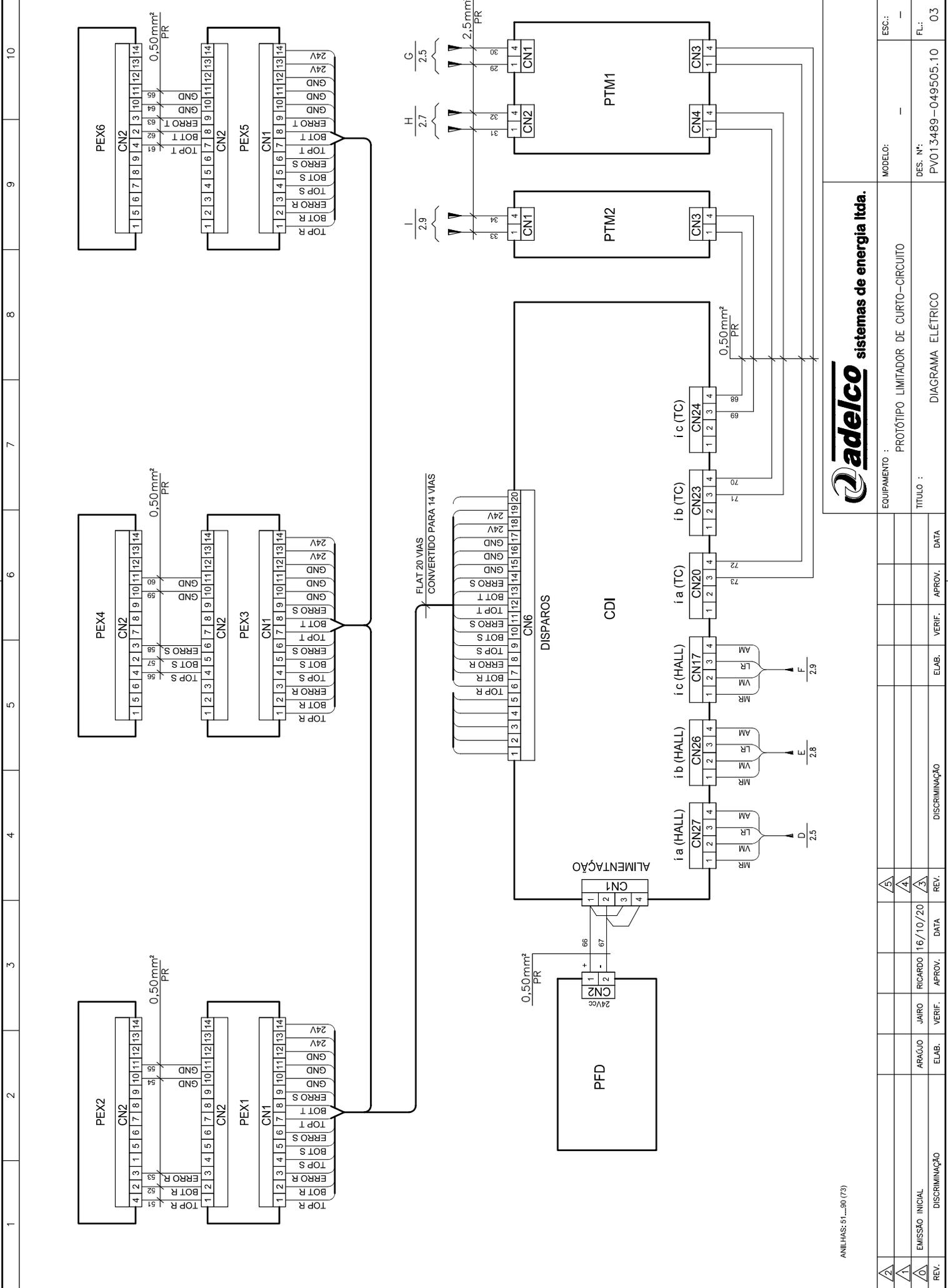
Anexos

ANEXO A – Protótipo limitador de corrente C.A.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<p>DESCRIÇÃO DO SISTEMA:</p> <p>O SISTEMA EM QUESTÃO TRATE-SE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.</p> <p>EM OPERAÇÃO NORMAL, CORRENTE DENTRO DA FAIXA DE OPERAÇÃO ACEITÁVEL (ATÉ 80A), A CHAVE ESTATÍCA À IGBT CONDUZ CORRENTE DA ENTRADA (X1) PARA SAÍDA (X3), MANTENDO OS REATORES EXTERNOS EM CURTO-CIRCUITO.</p> <p>NA OCORRÊNCIA DE UM CURTO-CIRCUITO NA SAÍDA, A CHAVE ESTATÍCA A IGBT IRÁ CORTAR DEIXANDO OS REATORES EM SÉRIE COM A ALIMENTAÇÃO (ENTRE X1 E X3) PRA LIMITAR O CURTO-CIRCUITO.</p> <p>COM A OCORRÊNCIA ACIMA CITADA SANADA, A CHAVE ESTATÍCA VOLT A CONDUZIR INIBINDO OS REATORES NOVAMENTE.</p> <p>O ESCOPO DESSE FORNECIMENTO NÃO CONTEMPLA O FIRMWARE DE CONTROLE/MONITORAÇÃO.</p>									
<p>NOTAS:</p> <p>(1) INTERLIGAÇÃO ESCOPO ADELCO, 3 X CONDUTOR 35mm² PRETO DE 3mm (TOTALIZANDO 6 CONDUTORES)</p> <p>(2) MEDIÇÃO ORIUNDA DE TC E DE Sonda HALL NAS 3 FASES</p> <p>(3) CONSIDERADO NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO.</p>									



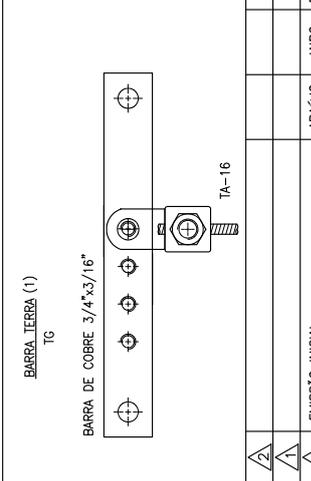
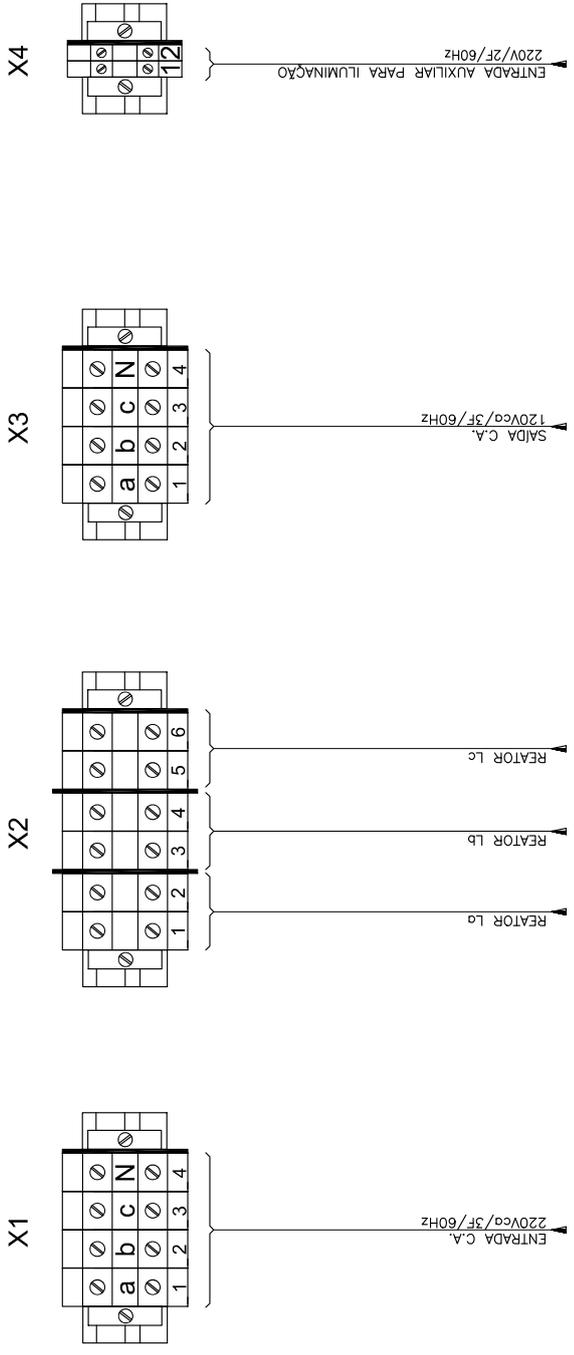
 Adelco sistemas de energia ltda.		EQUIPAMENTO :		PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO		MODELO:	-	ESC.:	-	
		TÍTULO :		UNIFILAR		DES. N.º:	PV/013489-049505.10	FL.:	01	
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
2										
1	EMISSAO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20					
0	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA



ANLHAS: 51....80 (73)

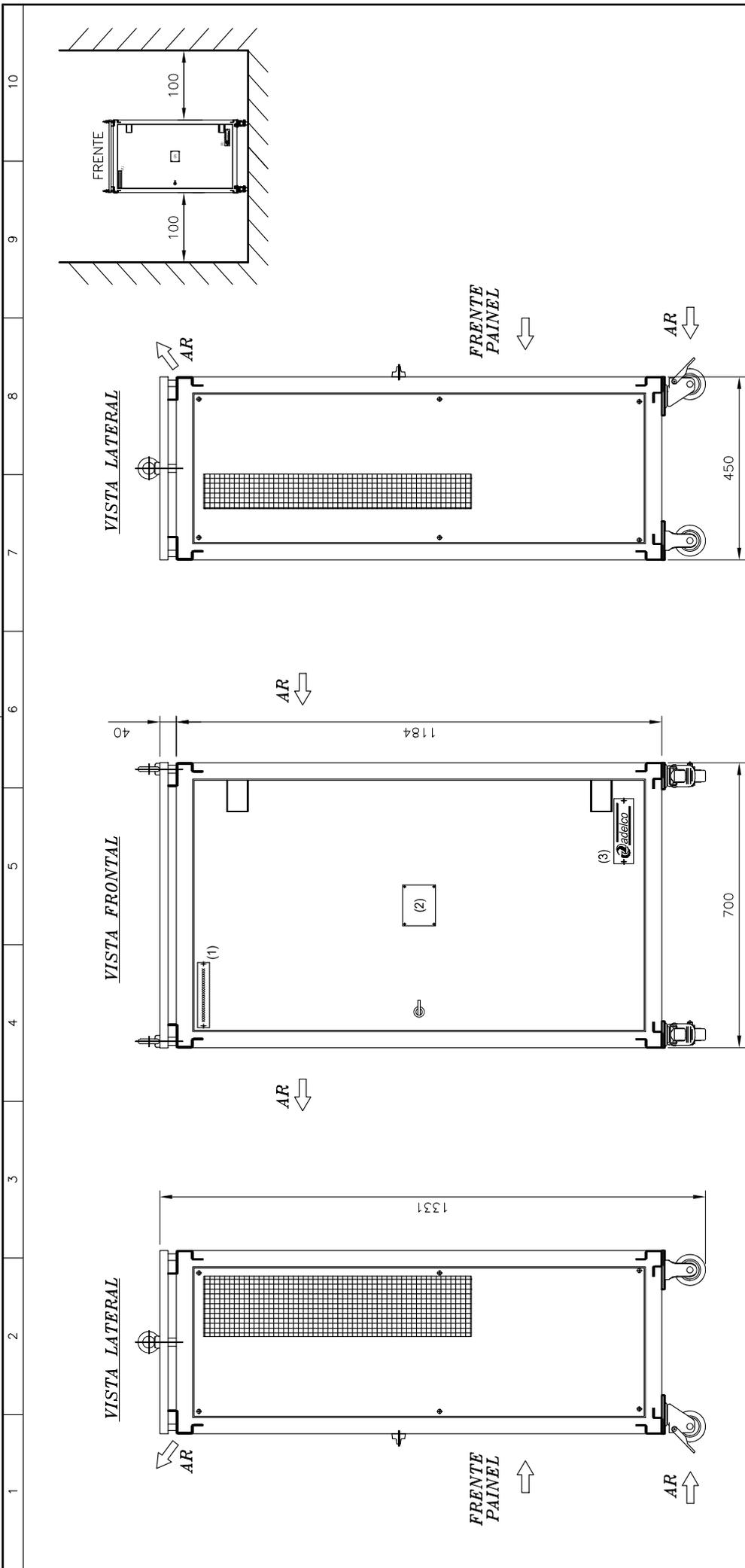


2	3	4	5	6	7	8	9	10	
△									
△									
△	ARAGUO	JAIRO	RICARDO	16/10/20					
REV.	DISCRIMINAÇÃO	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
EQUIPAMENTO : PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO									
TÍTULO : DIAGRAMA ELÉTRICO									
MODELO : -									
DES. N.º : PV013489-049505.10									
ESC.: -									



Adelco sistemas de energia ltda.		MODELO:	-	ESC.:	-
		EQUIPAMENTO :	PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO	DES. N.º:	PV013489-049505.11
		TÍTULO :	RÉGUA DE BORNES	FL.:	03

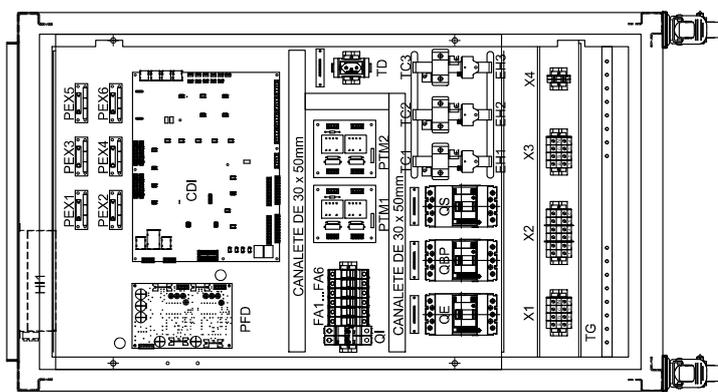
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
2										
1										
0	EMISSAO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20					



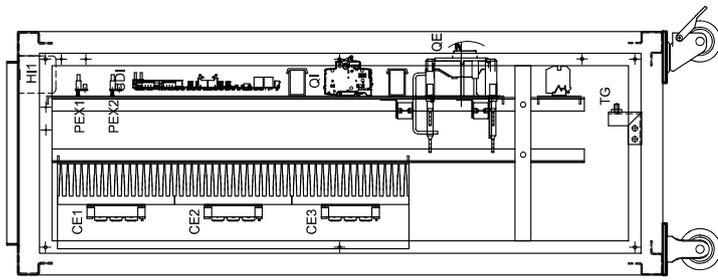
NOTAS:
 ESTRUTURA: CHAPA DE AÇO #14MSG
 PORTA: CHAPA DE AÇO #12MSG
 LATERAIS: TETO: CHAPA DE AÇO #14MSG
 PINTURA: INTERNO/EXTERNO CINZA MUNSELL N6.5
 PLACAS DE MONTAGEM: : LARANJA MUNSELL 2,5YR6/14
 PROCEDIMENTO DE PINTURA: IT 002
 GRAU DE PROTEÇÃO: IP-21
 PESO BRUTO APROX.: ~105kg
 DISSIPACÃO TÉRMICA: ~500W / 1,8BTU/h
 ENTRADA E SAÍDA DE CABOS: PARTE INFERIOR
 (1) - PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO
 (2) - PLAQUETA DE CARACTERÍSTICAS
 (3) - LIMITADOR DE PORTA

 Adelco sistemas de energia ltda.		EQUIPAMENTO :		PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO		MODELO:	-	ESC.:	-		
		TÍTULO :		DESENHO DIMENSIONAL		DES. N.º:	PV/013489-049505.20	FL.:	03		
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
2						5					
1	EMISSÃO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20	4					
0						3					

VISTA FRONTAL



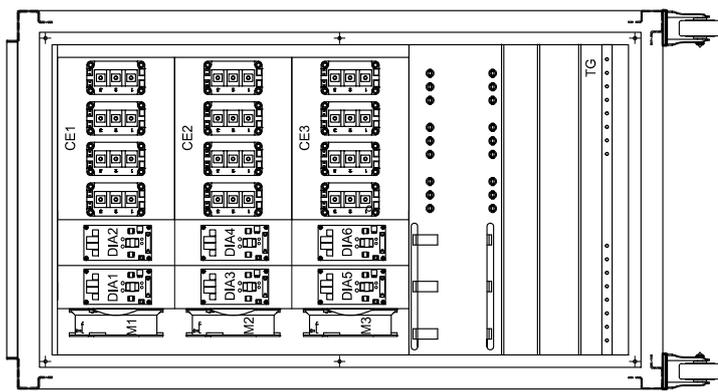
VISTA LATERAL



FRENTE PAINEL



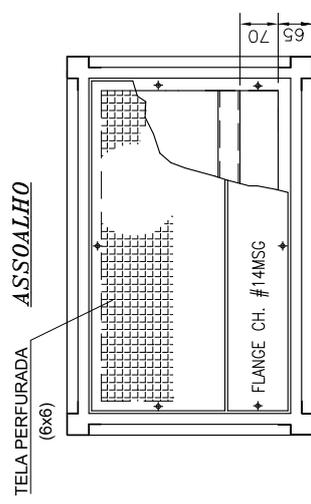
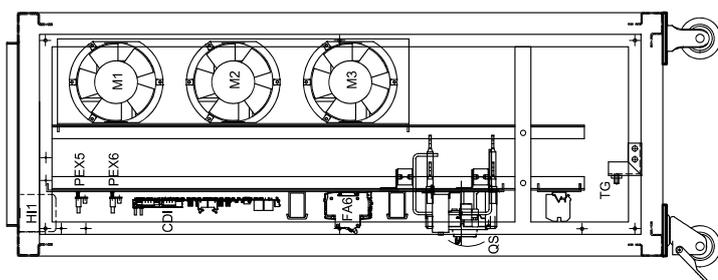
VISTA TRASEIRA



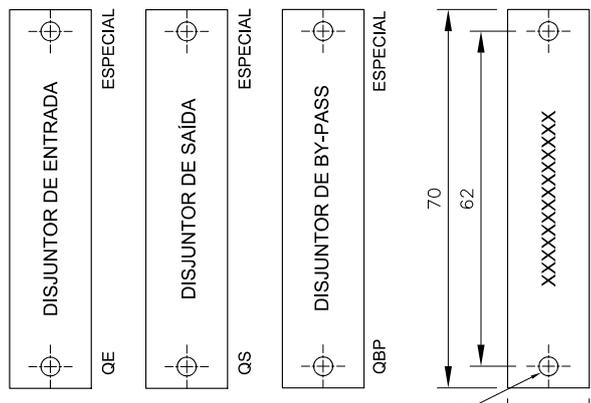
FRENTE PAINEL



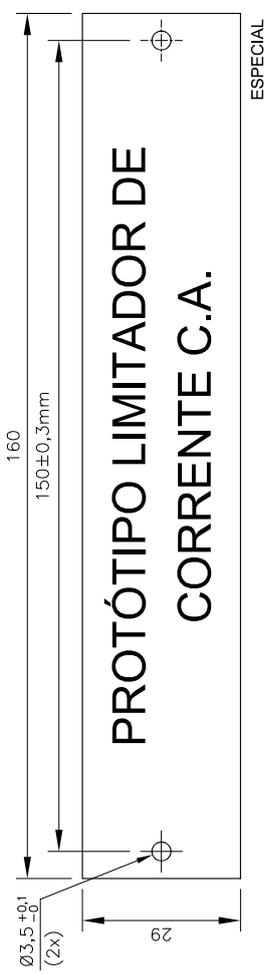
VISTA LATERAL



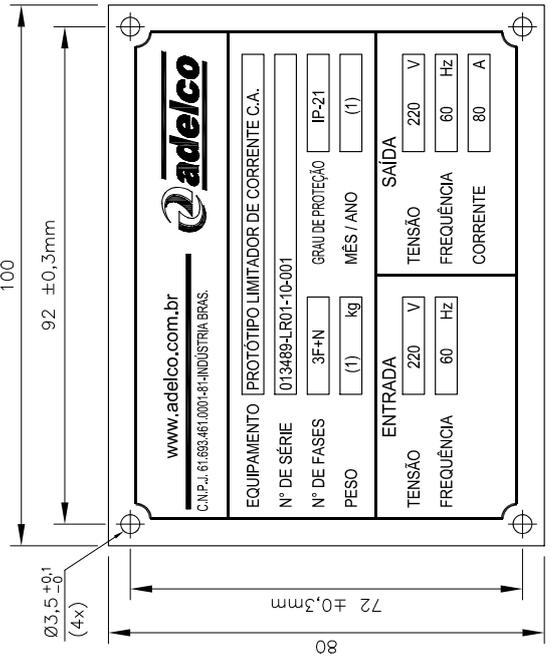
 Adelco sistemas de energia Ltda.		EQUIPAMENTO :		PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO	MODELO:	-	ESC.:	-		
		TÍTULO :		LAYOUT INTERNO	DES. N.º:	PV013489-049505.20	FL.:	03		
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
2							5			
1	EMISSAO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20		4			
0	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	3			



MATERIAL: ACRÍLICO - ESPESSURA: 2mm
 FUNDO: PRETO
 GRAVAÇÃO: BRANCO CENTRALIZADO
 LETRAS: 2,5mm
 FIXAÇÃO: PARAFUSADA
 TOLERÂNCIA DE CORTE: +0,2mm
 -0,0mm



MATERIAL: ACRÍLICO - ESPESSURA: 2mm
 GRAVAÇÃO: BAIXO RELEVO NA COR BRANCA
 FUNDO: PRETO
 LETRAS: ARIAL NEGRITO 6,0mm
 FIXAÇÃO: PARAFUSADA
 TOLERÂNCIA DE CORTE: +0,2mm
 -0,0mm



MATERIAL: ALUMÍNIO - ESPESSURA: 1mm
 GRAVAÇÃO: BAIXO RELEVO-COR PRETA
 TOLERÂNCIA DE CORTE: +0,2mm
 -0,0mm

(1) PREENCHIMENTO APÓS FABRICAÇÃO

 Adelco sistemas de energia Ltda.		EQUIPAMENTO : PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO TÍTULO : PLAQUETAS		MODELO : -	ESC.: -
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
1	EMISSÃO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20
2	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
3	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
4	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
5	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
6	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
7	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
8	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
9	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
10	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4. PLACAS E MODULOS ELETRONICOS									
ITEM	REFERENCIA	DENOMINAÇÃO	QTD	MODELO	DADOS PRINCIPAIS	FABRICANTE	PART-NUMBER	OBSERVAÇÕES	
4.1	PTM1, PTM2		2,00	PTM-001	PLACA MEDICAO IENTRADA 3F, TIPO: SUPERFICIE 2 TCS, IPR1: 5A, ISEC: 20MA, 2VA APLICACAO: CBA1000	Adelco	006978	***CONFIG. ESPECIAL, PRI: 5A, SEC: 4V***	
4.2	PDG		8,00	PDG-002	PLACA DE PROTECAO DOS GATES - PEP148 APLICACAO: MODULOS DE POTENCIA	Adelco	013872	***02 PCS RESERVADAS PARASOBRESSALENTE***	
4.3	CDI		1,00	CDI001	PLACA DE CONTROLE UPSD - PEP397 APLICACAO: UPSD	Adelco	039867		
4.4	PFD		1,00	PFD003	PLACA FONTE - PEP411 APLICACAO: LINHA DE EQUIPAMENTOS DSP	Adelco	043548	***SAIDA: CN2 = 24V, CN3 = 15V***	
4.5	DIA1...DIA6		6,00	DIA001	DRIVER INTERFACE ADELCO SINGELA, PEP425 APLICACAO: UPSM E EQUIPAMENTOS ESPECIAIS	Adelco	048248		
4.6	Q1...Q4		12,00	XZG3005D12P3	IGBT IC: 300A, VCE: 1200VCC	XIPOS	028347		
4.7			3,00	KM15	DISSIPADOR, ALUMINIO FRESADO DIM: 300MM	TCT	049410		
4.8	PEX1...PEX6		6,00	PEX-001	PLACA INTERFACE FLAT/CABO - PEP156, TIPO: SUPERFICIE APLICACAO: CBM9000, SPXL, SPXM, UPSM2000	Adelco	007135		

2											
1											
0	EMISSAO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20						
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA


Adelco sistemas de energia ltda.

EQUIPAMENTO :	PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO	MODELO:	-	ESC.:	-
TITULO :	LISTA DE MATERIAL	DES. N.º:	PV013489-049505.30	FL.:	04

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5. VENTILACAO									
ITEM	REFERENCIA	DENOMINACAO	QTD	MODELO	DADOS PRINCIPAIS		FABRICANTE	PART-NUMBER	OBSERVAÇÕES
5.1	M1...M3		3,00	UHP-301	CONECTOR HYLOCK 3 VIAS MATERIAL: NYLON COR: NATURAL TIPO: PLUG		Burndy	009457	
5.2	M1...M3		3,00	UHR-301	CONECTOR HYLOCK 3 VIAS MATERIAL: NYLON COR: NATURAL TIPO: RECEPTACULO		Burndy	009458	
5.3	M1...M3		9,00	UHM2210	TERMINAL MACHO PARA CONECTOR HYLOCK MATERIAL: LATAO, PRE-ESTANHADO TIPO: PINO PARTIDO		Burndy	011982	
5.4	M1...M3		9,00	UHC1210	TERMINAL FEMEA PARA CONECTOR HYLOCK MATERIAL: LATAO, PRE-ESTANHADO TIPO: SOQUETE		Burndy	011983	
5.5	M1...M3		3,00	RT-150 COD. 2004	TELA DE PROTECAO PARA VENT. RT-150		Nework	020419	***APLICAVEL PARA RT-172***
5.6	M1...M3		3,00	RT-172	EXAUSTOR/VENTILADOR VALIM: 115/230VCA-50/60HZ TIPO: SOQUETE		Nework	029527	VALIM: 120VCA



Adelco sistemas de energia ltda.

EQUIPAMENTO : PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO

TITULO : LISTA DE MATERIAL

MODELO: -

DES. N°: PV013489-049505.30

ESC.: -

FL.: 05

REV.	DISCRIMINACAO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINACAO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
2										
1										
0	EMISSAO INICIAL	ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20					
		ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	REV.	REV.	REV.	REV.	DATA

6. SOBRESSALENTES									
ITEM	REFERÊNCIA	DENOMINAÇÃO	QTD	MODELO	DADOS PRINCIPAIS	FABRICANTE	PART-NUMBER	OBSERVAÇÕES	
6.1	DIA		2,00	DIA001	DRIVER INTERFACE ADELCO SINGELA, PEP425	Adelco	048248		
6.2	Q1..Q4		4,00	X2G300SD12P3	APLICACAO: UPSM E EQUIPAMENTOS ESPECIAIS IGBT IC: 300A, VCE: 1200VCC	XIPOS	028347		
6.3	CDI		1,00	KM15	DISSIPADOR, ALUMINIO FRESADO DIM: 300MM	TCT	049410		



Adelco sistemas de energia ltda.

EQUIPAMENTO : PROTÓTIPO LIMITADOR DE CURTO-CIRCUITO

TÍTULO : LISTA DE MATERIAL

MODELO: -

DES. N°: PV013489-049505.30

ESC.: -

FL.: 06

REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA
2										
1		ARAÚJO	JAIRO	RICARDO	16/10/20					
0	EMISSÃO INICIAL	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA

ANEXO B - Protótipo reator com núcleo de ar

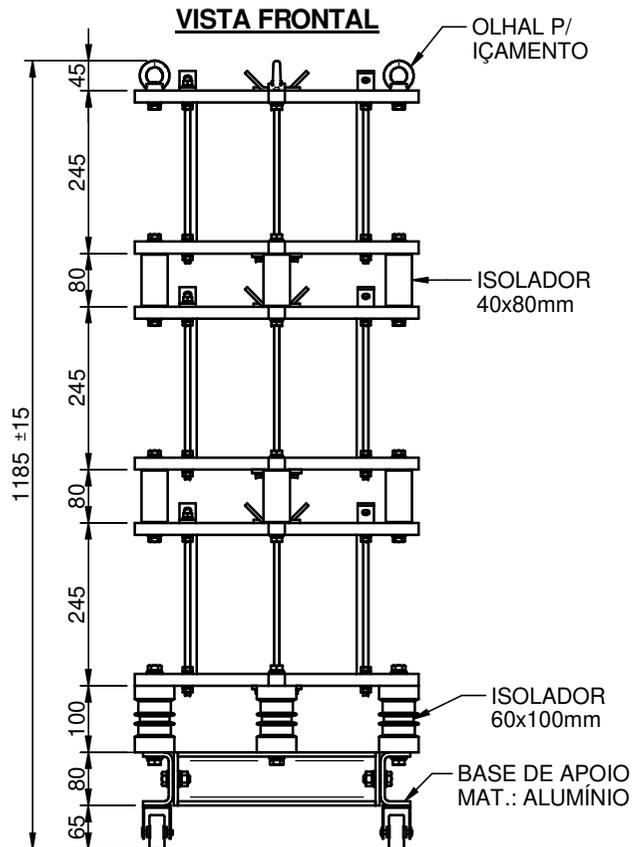
1	2		3		4		5					6	7	8	9	10
TÍTULO			Nº DESENHO		Nº	REV.	DISTRIBUIÇÃO INTERNA					OBSERVAÇÃO				
					FOLHA	R	C	E	T	M	P					L
LISTA DE DOCUMENTOS			PV 013489.08-049378.20		01	2	X	X	X	X	X	X	X			
DIMENSÕES EXTERNAS			PV 013489.08-049378.20		02	1	X	X	X	X	X	X				
PLACA DE CARACTERÍSTICAS			PV 013489.08-049378.20		03	0	X	X			X	X				
FOLHA DE DADOS			PV 013489.08-049378.43		01	0	X				X					
ENROLAMENTO			049378.21		02	1	X				X					

REATOR COM NÚCLEO DE AR
MODELO: RNA 2000-50
INDUTÂNCIA: 2,0 mH
TAP's: 1,0 mH e 1,5 mH
CORRENTE: 50 A
CLIENTE: FUNDAÇÃO EUCLIDES DA CUNHA

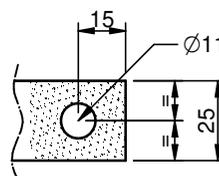
REV.4
09/98

2	DETALHAMENTOS DO ENROLAMENTO.				DIEGO	CARLOS	EVANDRO	17/11/2020	5	EQUIPAMENTO :			REATOR COM NÚCLEO DE AR		MODELO:	RNA 2000-50	ESC.:	S/E	
1	COLOCAÇÃO DE RODAS.				DIEGO	CARLOS	EVANDRO	16/11/2020	4	TÍTULO :			LISTA DE DOCUMENTOS		DES. Nº:	PV 013489.08-049378.20	FL.:	01	
0	EMISSÃO INICIAL.				DIEGO	CARLOS	EVANDRO	16/10/2020	3										
REV.	DISCRIMINAÇÃO				ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	REV.	DISCRIMINAÇÃO			ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA			

VISTA FRONTAL



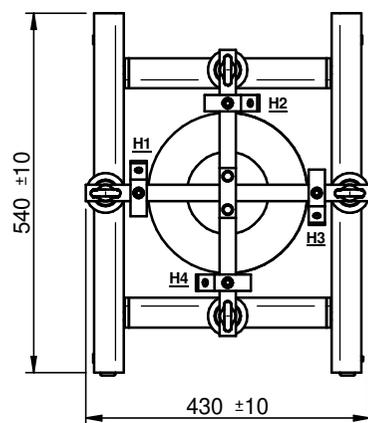
DETALHE DOS TERMINAIS H1/H2/H3/H4



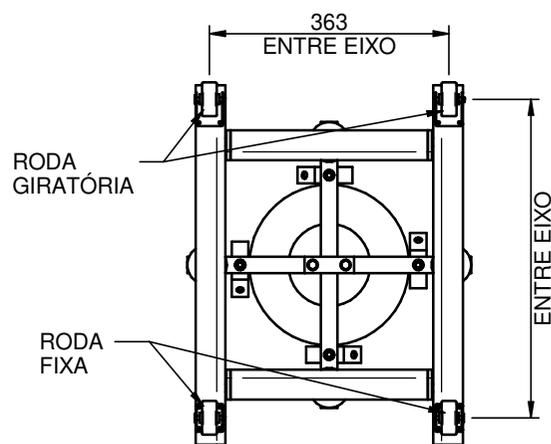
MATERIAL: ALUMÍNIO
ESPESSURA: 4,76mm
ACABAMENTO: ESTANHADO

CORRENTE: 50A
INDUTÂNCIA: 2mH
TAP'S: 1mH / 1,5mH
PERDAS TOTAIS: 1300W
GRAU DE PROTEÇÃO: IP-00
MATERIAL CONDUTOR: ALUMÍNIO
MASSA TOTAL APROXIMADA: 40 kg

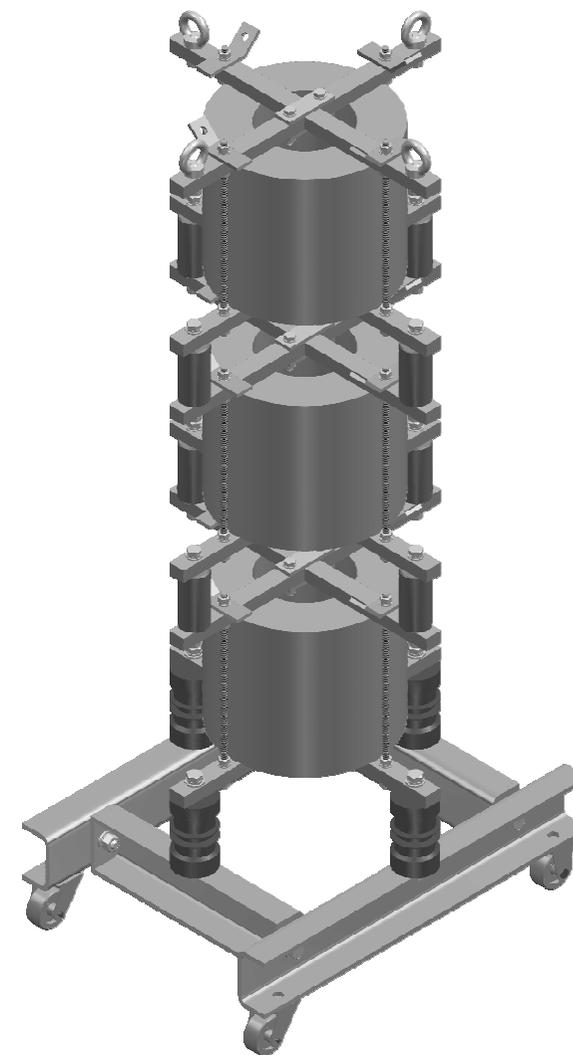
VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR



REATOR NÚCLEO DE AR MODELO: RNA 2000-50

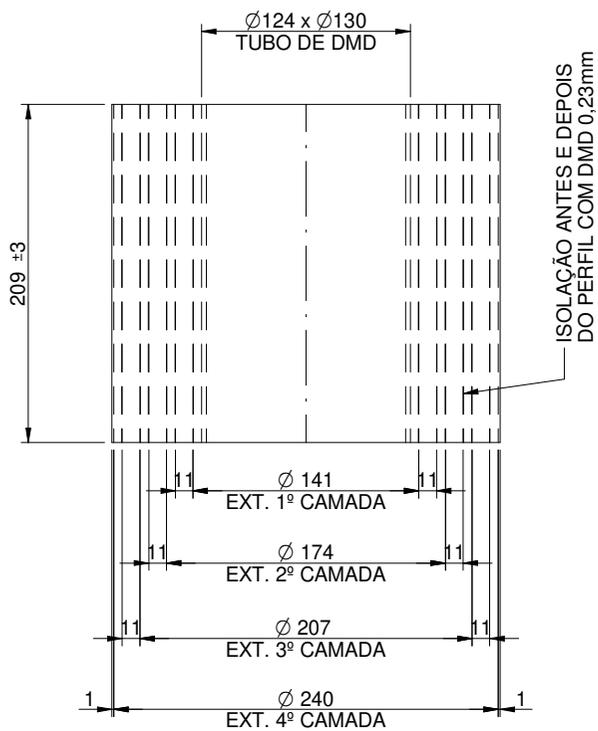


NOTA: DESENHO PRELIMINAR INFORMATIVO, DIMENSÕES E ACESSÓRIOS
PODEM SOFRER ALTERAÇÕES NO PROJETO FINAL.

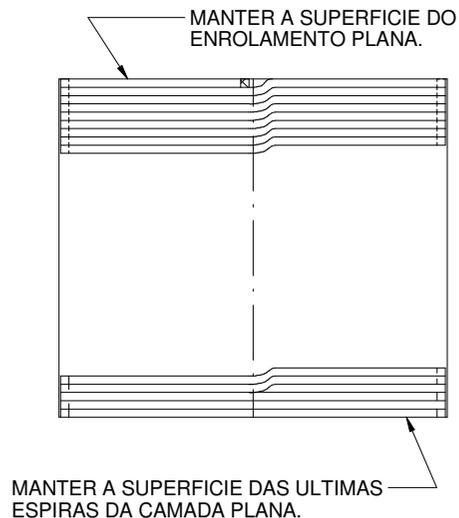
adelco sistemas de energia ltda.

EQUIPAMENTO :		MODELO:	ESC.:
REATOR COM NÚCLEO DE AR		RNA 2000-50	-
TÍTULO :		DES. Nº:	FL.:
DIMENSÕES EXTERNAS		PV013489.08-049378.20	02

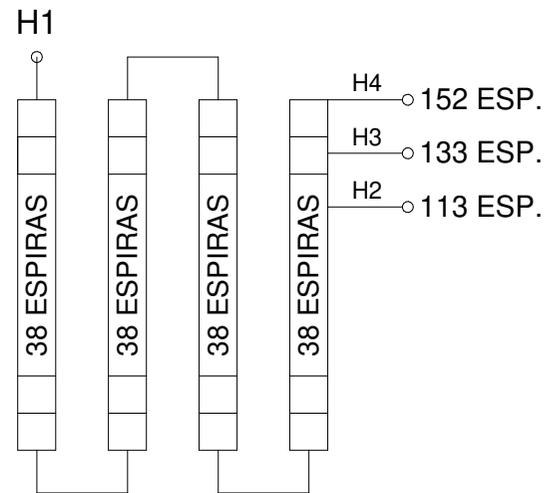
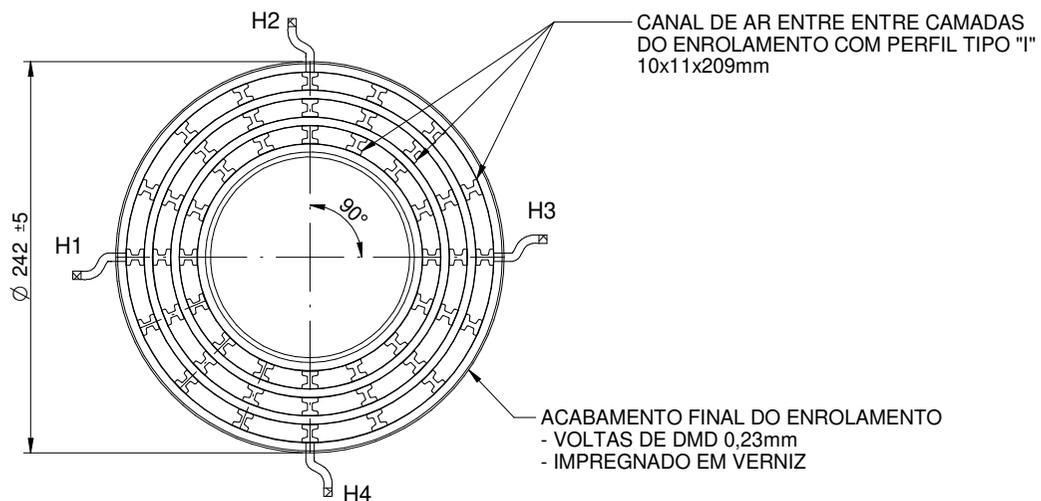
2						5					
1	COLOCAÇÃO DE RODAS.	DIEGO	CARLOS	EVANDRO	16/11/2020	4					
0	EMISSÃO INICIAL.	DIEGO	CARLOS	EVANDRO	16/10/2020	3					
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA



DETALHE DO ENROLAMENTO



DADOS PARA ENROLAMENTO	
CONDUTOR	AL 5,0x5,0mm Isol-Mylar
SECÇÃO DO CONDUTOR	25mm ²
NÚMERO DE ESPIRAS	152
NÚMERO DE CAMADAS	04
ISOLAÇÃO DO ENROL.	DMD
MASSA DA ISOLAÇÃO	- kg
SENTIDO DE ENROL.	ESQUERDO
COMPR. TOTAL P/ ENROL.	- m
MASSA TOTAL CONDUTOR:	- kg



adelco sistemas de energia ltda.

CLASSE F

2						5						EQUIPAMENTO :	MODELO:	ESC.:
1	DETALHAMENTOS.	DIEGO	CARLOS	EVANDRO	17/11/2020	4						REATOR COM NÚCLEO DE AR	RNA 2000-50	-
0	EMIÇÃO INICIAL.	DIEGO	CARLOS	EVANDRO	19/10/2020	3						TÍTULO :	DES. Nº:	FL.:
REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	REV.	DISCRIMINAÇÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.	DATA	ENROLAMENTO	049378.21	02

1		CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	
2.18	Classe térmica do isolamento: F(155 °C)	2.19	Sobreelevação máxima de temperatura: 100 °C
1.1	Tipo de instalação: <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Interna	2.20	Corrente térmica de curto suportável: 0,1 kA/1 s
1.2	Serviço: Contínuo	2.21	Corrente dinâmica de curto suportável: 0,25 kA
1.3	Altitude: Até 1000 m acima do nível do mar	2.22	Material dos enrolamentos: <input checked="" type="checkbox"/> Alumínio <input type="checkbox"/> Cobre
1.4	Temperatura ambiente máxima: -5 °C a +40 °C	2.23	Acabamento: Impregnado
1.5	Frequência: 60 Hz	2.24	Massa total aproximada: 12 kg
1.6	Proximidade do mar: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	2.25	Dimensões aproximadas:
1.7	Classificação da área: N.A.		A: 245 mm / Ø: 220 mm
1.8	Condições especiais: N.A.	2.26	Grau de proteção: IP-00
2		CARACTERÍSTICAS GERAIS	
2.1	Quantidade: 03 peças	2.27	Distâncias Mínimas Entre Eixos dos Reatores:
2.2	Fabricante: ADELCO		375 mm - Não aplicável, pois montagem empilhada
2.3	Potência do Reator: 2 kVAr		
2.4	Tipo: RNA 2000-50		
2.5	Número de fases: <input checked="" type="checkbox"/> Monofásico <input type="checkbox"/> Trifásico	3	
2.6	Aplicação: <input type="checkbox"/> Limitação de corrente de inrush	3.1	<input checked="" type="checkbox"/> Base em alumínio
	<input checked="" type="checkbox"/> Limitação de curto-circuito	3.2	<input checked="" type="checkbox"/> Isoladores epóxi 1,1 kV
	<input type="checkbox"/> Filtro de harmônicas	3.3	<input checked="" type="checkbox"/> Terminais de ligação com furação NEMA
	<input type="checkbox"/> Alisamento em corrente contínua	3.4	<input type="checkbox"/> Conectores para cabos
	<input type="checkbox"/> Reator Shunt	3.5	Placa de características:
2.7	Refrigeração: Ar natural		<input type="checkbox"/> Alumínio anodizado <input checked="" type="checkbox"/> Aço inoxidável
2.8	Indutância nominal: 2,0 mH	3.6	<input checked="" type="checkbox"/> Suspensão: Furos na cruzeta superior
2.9	Tap's: 1,5 - 1,0 mH	3.7	<input checked="" type="checkbox"/> Montagem empilhada do conjunto trifásico
2.10	Tolerância de fabricação: + 10% / - 0%		
2.11	Corrente nominal: 50 A	4	
2.12	Corrente total incluindo harmônicas: N.A.	NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL	
2.13	Reatância nominal (60 Hz): 0,75 Ω	4.1	Entidade: ABNT
2.14	Perdas totais máx. por fase (Ieq e 75 °C): 433 W		Nº da norma: ABNT NBR 5356-6
2.15	Fator de qualidade aprox. (60 Hz e 75 °C): 6	4.2	Relação dos ensaios
2.16	Tensão nominal: 220 V		Ensaio de rotina: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
2.17	Nível de isolamento: 1,1 kV		Ensaio de tipo: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não
	Aplicada: 3 kV /1min NBI : - kV		



REATOR NÚCLEO DE AR

RIF LAB TR-020
Rev.3 09/15
FL .01/02

Cliente:	FUNDAÇÃO EUCLIDES DA CUNHA	Nº SÉRIE	13489-LR01-08-001 13489-LR01-08-002 13489-LR01-08-003
P.V.:	13489.08	Modelo:	RNA 2000-50

Características do Reator

tipo:	MULTICAMADAS	Uso:	EXTERNO	Material Enrolamento
Indutância (uH):	2000	I térmica (1s):	0,10 kA	ALUMINIO
I nominal (A):	50	I dinâmica:	0,25 kA	Potência:2 KVAR
Frequência (Hz):	60	Nível de isol.:	3 / - KV	
Aplicação:	Reator monofásico a seco limitador de corrente de curto-circuito 0,25kA			

Medição da Resistência e da Impedância

Nº de série:	Terminais	Res. à Tm (m Ohms)	Temp. de medição (° C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Impedância à Tm (mOhms)	Correção Wattmetro	Perdas Medidas
13489-LR01-08-001	H1-H2	73,320	29,0	20,20	49,91	404,73	1	190,2
	H1-H3	91,510	29,0	29,89	50,14	596,11	1	239,9
	H1-H4	108,780	29,0	40,09	50,23	798,05	1	286,6
13489-LR01-08-002	H1-H2	74,110	29,0	20,21	50,07	403,63	1	198,2
	H1-H3	92,460	29,0	29,75	50,03	594,72	1	234,8
	H1-H4	109,980	29,0	40,15	50,06	802,06	1	288,9
13489-LR01-08-003	H1-H2	73,250	29,0	20,24	50,03	404,60	1	197,2
	H1-H3	91,320	29,0	29,81	50,07	595,35	1	240,1
	H1-H4	108,540	29,0	40,38	50,14	805,43	1	291,3

Resistência e Impedância à 75 ° C, 60 Hz e cálculo da Indutância

Nº de série:	Terminais	Resistência (m Ohms)	Impedância (mOhms)	Reatância indutiva calc. (mOhms)	Indutância (uH)	Desvio em relação à garantia (%)	Perdas corrigidas a Tm (W)	Perdas corrigidas a 75°C
13489-LR01-08-001	H1-H2	86,5984	407,34	398,03	1055,81	5,58	191	223
	H1-H3	108,0827	598,88	589,04	1562,49	4,17	239	279
	H1-H4	128,4803	800,97	790,60	2097,13	4,86	284	331
13489-LR01-08-002	H1-H2	87,5315	406,31	396,77	1052,46	5,25	198	229
	H1-H3	109,2047	597,55	587,49	1558,37	3,89	235	276
	H1-H4	129,8976	805,03	794,49	2107,44	5,37	288	336
13489-LR01-08-003	H1-H2	86,5157	407,21	397,92	1055,50	5,55	197	228
	H1-H3	107,8583	598,11	588,30	1560,53	4,04	239	279
	H1-H4	128,1969	808,31	798,08	2116,98	5,85	290	336

VALORES DE FATOR DE QUALIDADE DO REATOR

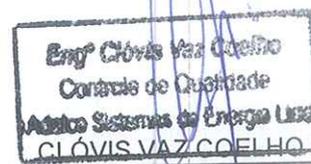
FL. 02/02

	Q	Q	Q
Nº	29,0 °C/60Hz	Q= 75 °C/60Hz	Q= 115 °C/60Hz
13489-LR01-08-001	5,4	4,6	4,1
	6,4	5,4	4,8
	7,3	6,2	5,4
13489-LR01-08-002	5,4	4,5	4,0
	6,4	5,4	4,7
	7,2	6,1	5,4
13489-LR01-08-003	5,4	4,6	4,1
	6,4	5,5	4,8
	7,4	6,2	5,5

Observações:

WALDICK NERY

Inspetor-Lab. Testes Trafo



Coordenador
Lab. Testes Trafo

17/11/2020

Data:

Inspetor / Cliente:

ADELCO SISTEMAS DE ENERGIA LTDA.

Av. da cachoeira, 660/706 - Cruz Preta - Barueri - SP - CEP - 06413-000
Tel. +55-11-4199-7500-Fax. +55-11-4161-5307 - http://www.adelco.com.br