



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Felipe Pretti Pessoa

Cálculo dos parâmetros do arco elétrico para simulações em sistemas de corrente contínua

Campinas

2021

Felipe Pretti Pessoa

Cálculo dos parâmetros do arco elétrico para simulações em sistemas de corrente contínua

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Energia Elétrica.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Maria Cristina Dias Tavares

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Felipe Pretti Pessoa, orientado pela Prof^ª. Dr^ª. Maria Cristina Dias Tavares.

Campinas

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P439c Pessoa, Felipe Pretti, 1987-
Cálculo dos parâmetros do arco elétrico para simulações em sistemas de corrente contínua / Felipe Pretti Pessoa. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Arco elétrico. 2. Curtos-circuitos. 3. Transitórios (Eletricidade). 4. Sistemas elétricos de potência. 5. Algoritmos genéticos. I. Tavares, Maria Cristina Dias, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Arc parameters calculation for DC systems simulations

Palavras-chave em inglês:

Electric arc

Short-circuit

Transient (Electricity)

Electric power systems

Genetic algorithms

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Maria Cristina Dias Tavares [Orientador]

Antonio Carlos Siqueira de Lima

George Rossany Soares de Lira

Data de defesa: 28-01-2021

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-5138-628X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/939887498172098>

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Felipe Pretti Pessoa RA: 230006

Data de defesa: 28 de janeiro de 2021

Titulo da Dissertação: "CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO ARCO ELÉTRICO PARA SIMULAÇÕES EM SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA"

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente)

Prof. Dr. Antonio Carlos Siqueira de Lima

Prof. Dr. George Rossany Soares de Lira

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem eles nada seria possível. Agradeço em especial ao meu querido pai Sávio (in memoriam), que foi o meu maior incentivador desde o início, e cujo empenho em me educar sempre veio em primeiro lugar.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, nosso pai criador, por ter sido tão generoso comigo e por ter me dado forças para superar todas as dificuldades durante o desenvolvimento deste trabalho. Tenho certeza de que tudo que conquistei é graças a Ele.

Aos meus pais, Sávio e Luciene, por todo amor, carinho, dedicação e afeto proporcionados durante minha vida, além do esforço e abnegação desprendidos para que eu pudesse ter uma educação de qualidade. Gostaria que meu pai, que partiu durante o desenvolvimento deste trabalho, estivesse aqui não só para presenciar a conclusão desta jornada, mas também para conhecer a sua neta que está a caminho.

Agradeço também a minha amada esposa Érika, que foi capaz de suportar todos os momentos de estresse durante o processo, e ainda me deu o maior presente, nossa pequena Vitória.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Dias Tavares, que além de ter aberto as portas e me aceitado de braços abertos, dedicou valiosas e incontáveis horas a esse projeto, com quem compartilhei minhas dúvidas e dificuldades, sempre com uma presença otimista e solícita. Agradeço por ter me ajudado sempre que precisei, seja por meio da sua efetiva dedicação à orientação, como também pela sua paciência, compreensão e humildade. Muito obrigado por tudo, professora!

A todos os amigos que tive a oportunidade de fazer no Laboratório de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e de Proteção em Sistemas de Potência (LTRANSP), e que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

A Marinha do Brasil, pela oportunidade e pelo voto de confiança depositados em mim para que eu pudesse me aperfeiçoar profissionalmente. Decerto os conhecimentos adquiridos durante o curso serão de grande valia para o desenvolvimento de minhas futuras atividades técnicas.

*“Ninguém cruza nosso caminho por acaso e nós não entramos na vida de ninguém sem
nenhuma razão”*

(Francisco Cândido Xavier)

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo da modelagem e representação da eliminação de um curto-circuito em sistemas de corrente contínua utilizando programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo (*Electromagnetic Transient Program* - EMT), com foco na representação do arco elétrico causado pela abertura dos dispositivos de proteção. O conteúdo abordado pode ser dividido em duas partes.

Na primeira parte do trabalho é feita uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno do arco elétrico, mostrando suas principais características e comportamento durante a interrupção de correntes de curto-circuito em sistemas CC com tensões de até 3600 V. Nesta parte são apresentados os principais modelos de arco elétrico existentes na literatura, assim como algumas das técnicas comumente utilizadas para estimação de seus parâmetros.

Já na segunda parte do trabalho, é implementada a simulação de um teste de curto-circuito realizado em um sistema ferroviário protegido por um disjuntor de corrente contínua de ação rápida, com objetivo de reproduzir um registro real de oscilografia publicado em artigos internacionais. Para esta simulação foram testados os diferentes modelos de arco elétrico apresentados na primeira parte do trabalho, utilizando os parâmetros estimados com as técnicas estudadas na pesquisa. Foi possível verificar a aderência entre as medições e simulações, constatando a assertividade do método de estimação através da técnica de algoritmos genéticos.

Palavras-chaves: Arco elétrico; curto-circuito CC; sistemas CC.

Abstract

The aim of this work is to introduce the modeling and simulation studies of the short-circuit effect in direct current (DC) systems using electromagnetic transient calculation programs in the time domain (named EMT programs). The focus is on the representation of the electric arc effect caused by the opening of protection devices during a short-circuit event. The content covered can be divided into two parts.

In the first part of the work, it is performed a bibliographic review about the electric arc phenomenon, showing its main characteristics and its application in the interruption of short-circuit currents in DC systems with voltages up to 3600 V. In this part, the main electric arc models presented in the literature are reviewed, as well as some of the techniques commonly used to define their parameters.

In the second part, the simulation of a short-circuit test performed on a railway system protected by a DC High-Speed Circuit Breaker (HSCB) is implemented, aiming to reproduce a real oscillography record published in international articles. For this simulation, the different models of electric arc presented in the first part of the work were tested, in order to compare the simulated results with the measurements obtained from the tests. The simulated results were adherent to the measured data, attesting the adequacy of genetic algorithms in the parameter estimation process.

Keywords: Electric arc; dc short-circuit; dc system.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Curva típica de um curto-circuito CC (IEC)	21
Figura 2.2 – Curva típica de um curto-circuito CC (ANSI/IEEE)	23
Figura 2.3 – Arco elétrico em meio gasoso	24
Figura 2.4 – Distribuição de potencial de acordo com as regiões do arco elétrico	25
Figura 2.5 – Circuito exemplo	26
Figura 2.6 – Condições para um arco estável e para interrupção de um circuito CC	27
Figura 2.7 – Tendência da interrupção de corrente CC	29
Figura 2.8 – Curvas de curto-circuito de um teste realizado no ABB SACE	31
Figura 2.9 – Unidade de interrupção do disjuntor Masterpact (Schneider)	33
Figura 2.10 – Processo de interrupção de corrente no disjuntor a ar	33
Figura 2.11 – Disjuntores a ar com interrupção por circuito oscilatório	34
Figura 2.12 – Estrutura de um disjuntor a vácuo e detalhes dos contatos	35
Figura 2.13 – Exemplos de esquemas de disjuntores híbridos e de estado sólido	37
Figura 2.14 – Diagrama de blocos do modelo proposto por Habedank	43
Figura 2.15 – Representação gráfica do método de Amsink	46
Figura 2.16 – Representação do método generalizado	48
Figura 2.17 – Representação gráfica do método de Ruppe	50
Figura 2.18 – Metodologia de identificação de sistemas	53
Figura 2.19 – Fluxograma representativo do algoritmo genético	55
Figura 3.1 – Esquema do sistema de liberação e retenção do disjuntor BWS	58
Figura 3.2 – Esquema do circuito de teste	59
Figura 3.3 – Formas de onda para $I_{SS} = 5453$ A e $t_c \approx 9,2$ ms	60
Figura 3.4 – Formas de onda para $I_{SS} = 5278$ A e $t_c \approx 16,4$ ms	60
Figura 3.5 – Formas de onda para $I_{SS} = 1553$ A e $t_c \approx 9,2$ ms	61
Figura 3.6 – Formas de onda para $I_{SS} = 1520$ A e $t_c \approx 16,4$ ms	61
Figura 3.7 – Leitura de tensão e corrente de arco no Matlab	62
Figura 3.8 – Exemplos de tratamento dos sinais de entrada	63
Figura 3.9 – Curvas de tensão e corrente de arco para teste 1	64
Figura 3.10 – Sinal da condutância original e com filtro	65
Figura 3.11 – Fluxograma do algoritmo genético	67
Figura 3.12 – Curva de condutância ajustada pelo modelo de Mayr	69
Figura 3.13 – Biblioteca de disjuntores	70
Figura 3.14 – Circuito simplificado para simulação	70
Figura 3.15 – Esquemático para cálculo dos parâmetros do circuito	71
Figura 3.16 – Corrente de curto-circuito esperada para teste 1	72
Figura 3.17 – Simulação do modelo Mayr	73

Figura 4.1 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 1	75
Figura 4.2 – Curvas de condutância ajustadas para o teste 1	76
Figura 4.3 – Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 1	77
Figura 4.4 – Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 1	77
Figura 4.5 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 2	78
Figura 4.6 – Curvas de condutância ajustadas para o teste 2	79
Figura 4.7 – Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 2	80
Figura 4.8 – Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 2	80
Figura 4.9 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 3	81
Figura 4.10–Curvas de condutância ajustadas para o teste 3	82
Figura 4.11–Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 3	83
Figura 4.12–Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 3	83
Figura 4.13–Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 4	84
Figura 4.14–Curvas de condutância ajustadas para o teste 4	85
Figura 4.15–Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 4	86
Figura 4.16–Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 4	86
Figura 4.17–Resultados dos testes	88
Figura A.1 – Inicialização do programa	100
Figura A.2 – Função de integração	100
Figura A.3 – Definição da classe do modelo de Mayr	101
Figura A.4 – Função de criação da população	101
Figura A.5 – Função de cruzamento e mutação	102
Figura A.6 – Função de seleção	102
Figura A.7 – Função de solução do problema	103
Figura A.8 – Função de visualização das soluções	103
Figura A.9 – Programa principal	104
Figura A.10–Resultados do programa para 10 repetições	105
Figura B.1 – Modelo resistência variável ATP (TYPE-91)	107
Figura B.2 – Simulação do modelo de Mayr no ATP	108
Figura B.3 – Modelo resistência disjuntor com arco (PSCAD)	108
Figura B.4 – Circuito simulado no PSCAD	109
Figura B.5 – Resultado da simulação do modelo de Mayr no PSCAD	109
Figura B.6 – Simulações no Simulink, ATP e PSCAD	110

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Características das fontes de curto-circuito CC	22
Tabela 2.2 – Características dos métodos de determinação de parâmetros	56
Tabela 3.1 – Características dos ensaios de curto-circuito	59
Tabela 3.2 – Instantes de abertura do disjuntor	64
Tabela 3.3 – Tempos médios de execução do algoritmo genético para 100 gerações	67
Tabela 3.4 – Resultados da otimização para o modelo de Mayr	69
Tabela 3.5 – Parâmetros dos circuitos simulados	72
Tabela 3.6 – Resultados da simulação para o modelo de Mayr	73
Tabela 4.1 – Parâmetros do circuito do teste 1	76
Tabela 4.2 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 1	76
Tabela 4.3 – Parâmetros do circuito do teste 2	78
Tabela 4.4 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 2	79
Tabela 4.5 – Parâmetros do circuito do teste 3	81
Tabela 4.6 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 3	82
Tabela 4.7 – Parâmetros do circuito do teste 4	84
Tabela 4.8 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 4	85
Tabela 4.9 – Resultado dos experimentos	87
Tabela 4.10–Desempenho médio dos modelos de arco elétrico	89
Tabela 4.11–Variação dos parâmetros do circuito de teste	90
Tabela 4.12–Variação dos parâmetros dos modelos para testes 1 e 2	90

Lista de abreviaturas e siglas

ABB	Asea Brown Boveri
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmos genéticos
ANSI	American National Standards Institute
ATP	Alternative Transient Program
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
EMTP	Electromagnetics Transient Program
HSCB	High-Speed Circuit Breaker
HVDC	High Voltage Direct Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineering
NBR	Norma Brasileira
PSCAD	Power System Aided Design
SF6	Hexafluoreto de enxofre
TACS	Transient Analysis of Control Systems

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos Gerais	17
1.3	Objetivos Específicos	18
1.4	Contribuições da Pesquisa	18
1.5	Publicações Decorrentes da Pesquisa	19
1.6	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	Estudo do Curto-Circuito CC	20
2.2	O Arco Elétrico	24
2.3	Interrupção de Corrente CC	26
2.3.1	Cálculo da corrente e energia do arco	28
2.3.2	Curvas típicas de curto-circuito	30
2.4	Disjuntor CC	32
2.4.1	O Disjuntor a ar	32
2.4.2	O Disjuntor a vácuo	35
2.4.3	O Disjuntor a ar comprimido	36
2.4.4	O Disjuntor a SF6	36
2.4.5	Disjuntores híbridos e de estado sólido	36
2.4.6	Modelo de disjuntor escolhido	37
2.5	Modelos de Arco Elétrico	38
2.5.1	Modelos do tipo caixa-preta	39
2.5.2	Modelo do arco de Cassie	40
2.5.3	Modelo do arco de Mayr	41
2.5.4	Modelo do arco de Habedank	42
2.5.5	Modelo do arco de Schwarz	43
2.6	Métodos de Identificação dos Parâmetros do Arco Elétrico	45
2.6.1	Método de Amsinck	45
2.6.2	Método de Rijanto	47
2.6.3	Método Generalizado (para 2 ensaios)	48
2.6.4	Método de Ruppe	48
2.6.5	Método de Zückler	50
2.6.6	Método de Glinkowski-Takanashi	51
2.6.7	Método de Asturiano	52

2.6.8	Método utilizando identificação de sistemas	52
2.6.9	Método utilizando algoritmos genéticos	54
2.7	Considerações Adicionais	55
3	DADOS E METODOLOGIA	58
3.1	Experimento de Referência	58
3.2	Tratamento de Dados	62
3.3	Cálculo dos Parâmetros do Arco Elétrico	65
3.3.1	Algoritmos genéticos	66
3.3.2	Método de integração	68
3.4	Circuito Simulado	69
3.4.1	Parâmetros do circuito	71
3.5	Considerações Adicionais	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1	Teste 1	75
4.1.1	Curvas de tensão e corrente do teste 1	77
4.2	Teste 2	78
4.2.1	Curvas de tensão e corrente do teste 2	80
4.3	Teste 3	81
4.3.1	Curvas de tensão e corrente do teste 3	83
4.4	Teste 4	84
4.4.1	Curvas de tensão e corrente do teste 4	86
4.5	Análise dos Resultados	87
4.6	Considerações Adicionais	89
5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICES	99
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE MAYR - AG	100
	APÊNDICE B – MODELOS DE ARCO ATP E PSCAD	106
B.0.1	Modelo de arco no ATP	106
B.0.2	Modelo de arco no PSCAD	108
B.0.3	Análise das simulações	110
	APÊNDICE C – CÓDIGO DE MAYR - MODELS	111

1 Introdução

A guerra das correntes disputada entre Nikola Tesla e Thomas Edison foi vencida pelo sistema de corrente alternada (CA) por diversas razões no século passado. No entanto, com o passar do tempo, desenvolvimentos recentes em eletrônica de potência, conversores estáticos e fontes de energia renováveis levaram ao aumento do uso de sistemas elétricos em corrente contínua (CC). Estes avanços permitiram realizar conversões de tensões que antes só eram possíveis de serem feitas por meio de transformadores CA. Linhas em extra-alta tensão em CC (HVDC) foram implementadas para transmissão de energia a longas distâncias, uma vez que as perdas em CC são menores do que as perdas CA, tornando-se uma alternativa competitiva. Dentre os benefícios da corrente contínua, vale ressaltar que não ocorre o fenômeno de efeito pelicular nos condutores nem o consumo/geração de reativo pela linhas, o que é muito relevante também no caso de transmissão por cabos subterrâneos ou submarinos (MACKAY, 2018). Por outro lado, o elevado consumo de energia reativa nas estações conversoras e a necessidade de instalação de filtros para reduzir o montante de harmônicas produzidas no processo de conversão das tensões podem ser elencados como alguns dos problemas associados à corrente contínua.

Importante ressaltar que no campo das fontes de energia renováveis existem características inerentes de sistemas CC, como é o caso da energia fotovoltaica e também do elo CC utilizado para desacoplar as velocidades de rotação da rede CA em sistemas eólicos (MACKAY, 2018). Além disso, tem grande destaque atualmente o tema de eletrificação do transporte: a evolução das baterias para utilização em veículos elétricos, juntamente com aplicações já conhecidas em outros campos, como o transporte ferroviário de cargas e passageiros (ROJEK; SIDOROWICZ, 2013), e também aplicações marítimas em navios de superfície e submarinos, com planejamento futuro para aplicações em média tensão (DOERRY, 2009), podem ser considerados como motivações para ampliação dos sistemas de distribuição CC.

No entanto, o processo de interrupção de corrente apresenta alguns desafios, pois diferente dos sistemas CA, onde existe um cruzamento natural da corrente por zero a cada semiciclo, esta característica é ausente em sistemas CC. A interrupção da corrente torna-se mais difícil, fazendo com que os disjuntores necessitem de dispositivos que forcem a corrente para zero para permitir a sua interrupção.

Um dos fenômenos naturais que auxilia o equipamento de abertura do circuito no cumprimento de sua função é o arco elétrico, que surge naturalmente com o afastamento dos contatos do disjuntor. As elevadas tensões do arco desenvolvidas durante a abertura de um disjuntor dotado de câmara de extinção fazem com que a taxa de variação da corrente

seja negativa, forçando assim a sua extinção.

Antes do disjuntor ser colocado em serviço, ele é submetido a uma série de ensaios e testes em laboratórios descritos em normas. Um dos principais testes realizados nestes equipamentos é o teste de curto-circuito, onde o disjuntor deve seccionar o circuito sob uma condição de defeito, de forma a verificar sua capacidade de interrupção e o tempo de atuação.

Os resultados destes testes podem ser registrados por meio de oscilografias. As curvas de corrente de curto-circuito e das tensões entre os contatos do disjuntor fornecem informações valiosas sobre os tipos de solicitações que os equipamentos instalados na rede estarão sujeitos quando estiverem em operação, tais como as sobretensões causadas pela abertura do disjuntor, além dos níveis de corrente e tempo até a extinção da corrente que os equipamentos deverão suportar.

1.1 Justificativa

Uma alternativa para obtenção das formas de onda de corrente e tensão causadas pela abertura de um disjuntor de corrente contínua é a realização de simulações em programas de transitórios eletromagnéticos. Os programas do tipo EMT¹ (*Eletromagnetic transient program*) são as principais ferramentas utilizadas para o estudo de transitórios eletromagnéticos devido ao chaveamento e manobras de dispositivos de proteção, sendo amplamente utilizados para simulação de sistemas de potência. Em sistemas CA os disjuntores são programados para abrir após um cruzamento da corrente por zero, o que não ocorre naturalmente em sistemas CC, onde os disjuntores devem provocar o cruzamento da corrente por zero (anular a corrente). Nos disjuntores eletromecânicos isto é feito por meio de uma câmara de extinção, que dependendo do nível de tensão pode ainda ter o auxílio de circuitos ressonantes, enquanto que os disjuntores híbridos e de estado sólido utilizam semicondutores. Contudo, os programas de simulação do tipo EMT não possuem modelos destes dispositivos em suas bibliotecas nativas, o que impossibilita uma simulação direta dos transitórios causados pela abertura de disjuntores em sistemas CC, sendo necessário o desenvolvimento de modelos.

1.2 Objetivos Gerais

A presente pesquisa tem como objetivo verificar a aplicação dos principais modelos de arco elétrico do tipo caixa preta na representação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de corrente contínua com tensões de até 3600 V. O foco deste trabalho será a

¹ Termo genérico que será utilizado ao longo do texto para identificar os diversos simuladores existentes que trabalham no domínio do tempo, como o ATP, PSCAD/EMTDC, EMTP-RV, Microtran, entre outros.

reprodução de eventos de curto-circuito em um sistema de tração ferroviária através de simulação digital, permitindo assim avaliar o nível de sobretensão causado pelo chaveamento de disjuntores eletromecânicos de ação direta, que são aqueles onde a extinção da corrente de falta se dá quase que exclusivamente pela ação do arco elétrico.

1.3 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal, foram identificados os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar as especificidades dos sistemas CC em relação aos estudos de curto-circuito, tais como as normas técnicas aplicáveis e o equacionamento matemático;
2. Realizar uma análise a respeito dos fenômenos físicos envolvidos na interrupção de corrente em sistemas CC, buscando entender o papel desempenhado pelo arco elétrico, seu processo de formação e suas principais características;
3. Estudar os principais modelos de representação do arco elétrico presentes literatura técnica, visando definir a melhor forma de representação do fenômeno para utilização em simulações de transitórios eletromagnéticos;
4. Escolher o experimento de referência que servirá de base para reprodução das curvas de curto-circuito;
5. Definir a metodologia utilizada na simulação do circuito de teste, desde a aquisição e tratamento de dados, até a implementação dos modelos e obtenção dos resultados; e
6. Realizar uma análise do desempenho e da precisão dos modelos de arco elétrico estudados. Nessa etapa, diversos modelos serão implementados para realização de simulações, e os resultados obtidos serão comparados com os dados de medições a fim de avaliar a precisão dos mesmos.

1.4 Contribuições da Pesquisa

No desenvolvimento deste trabalho foram realizadas algumas contribuições para o tema abordado, dentre as quais pode-se destacar:

1. Implementação de alguns dos principais modelos de arco elétrico na representação de registros reais de curto-circuito em sistema CC;
2. Definição de uma metodologia para estimar os parâmetros dos modelos de arco elétrico baseada em algoritmos genéticos; e

3. Avaliação de desempenho dos modelos escolhidos, permitindo verificar a eficiência de cada um, e destacar seus pontos positivos e negativos.

1.5 Publicações Decorrentes da Pesquisa

- **Pessoa, F.P.; Sarmiento, J.S.A.; Tavares, M.C.** Cálculo dos parâmetros do arco elétrico em sistemas de corrente contínua utilizando teoria de identificação de sistemas. XXIII Congresso Brasileiro de Automática – XXIII CBA, Santa Maria, RS, (virtual) 23-26 novembro 2020.

1.6 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está estruturada em 5 capítulos, cujo conteúdo abordado em cada um é descrito a seguir.

No capítulo 1 é realizada uma breve introdução ao tema estudado, onde são apresentados a motivação, a relevância, a justificativa e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre o estudo do curto-circuito em sistemas de corrente contínua e o papel do arco elétrico no processo de interrupção de corrente. Nesta etapa, inicialmente é descrita de maneira sucinta as características do curto-circuito em sistemas CC, abordando normas e guias existentes para o cálculo da corrente de curto, para em seguida apresentar o fenômeno do arco elétrico, descrevendo seu processo de formação, suas principais características e sua importância para os dispositivos de proteção. Por fim, são apresentados os principais modelos matemáticos existentes na literatura para representação do arco elétrico, assim como os métodos utilizados para determinação de seus parâmetros.

No capítulo 3 é apresentado o experimento de referência a ser estudado, fazendo uma breve exposição do problema para em seguida detalhar a metodologia de implementação de um dos modelos de arco estudados, visando reproduzir o experimento realizado em campo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações para diferentes modelos de arco elétrico, assim como uma análise dos principais aspectos de cada modelo, destacando seus pontos positivos e suas limitações.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta algumas das principais características dos sistemas de corrente contínua, dando ênfase ao estudo do curto-circuito e de sua extinção por meio de dispositivos de proteção. O fenômeno do arco elétrico é descrito, abordando o seu processo de formação e também o seu papel na extinção das correntes dentro do disjuntor. Em seguida são apresentados os principais modelos de arco elétrico presentes na literatura e suas formas de representação, para posteriormente abordar algumas das técnicas utilizadas para identificação dos parâmetros dos modelos mencionados.

2.1 Estudo do Curto-Circuito CC

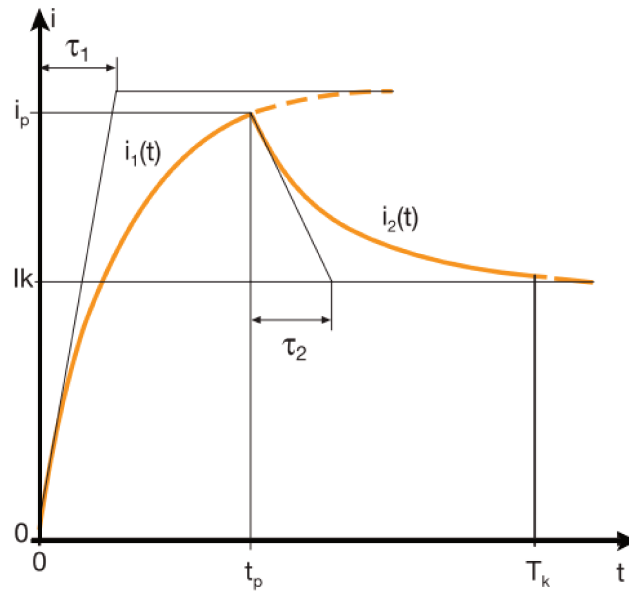
O estudo de curto-circuito é um passo essencial para o projeto do sistema de proteção, uma vez que os valores máximos de corrente devem ser considerados na escolha de diversos equipamentos do sistema, como cabos, barramentos e outros equipamentos de suporte.

Para J.C. Das (2017), embora existam documentos com procedimentos simplificados para o cálculo de curto-circuito em corrente contínua, eles não estão bem estabelecidos, pois não existe uma norma ANSI ou IEEE que padronize este tipo de cálculo para sistemas CC. O que existe são alguns guias, como o publicado pela General Electric (GE, 1978) e a norma ANSI/IEEE STD C37.14 (1972). O único documento que aborda este tema de forma abrangente é a norma IEC 61660-1 (1997), que trata do cálculo de curto-circuito em instalações auxiliares de usinas e subestações, mas não inclui outros sistemas de grande porte, como sistemas elétricos de tração e transporte ferroviário.

Uma das especificidades do estudo de curto-circuito CC é que, ao contrário da abordagem para o cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos CA, é necessária a determinação do curso exato da corrente de curto-circuito, além do cálculo de parâmetros definidos (SCHLABBACH, 2005). Essa necessidade ocorre pois as fontes CC possuem dinâmicas distintas, sendo que cada uma contribui com um tempo de resposta e valor de pico esperado diferentes para a corrente de curto resultante.

De acordo com a norma IEC 61660-1 (1997), a Figura 2.1 representa uma curva típica de curto-circuito num circuito alimentado em corrente contínua.

Figura 2.1 – Curva típica de um curto-circuito CC (IEC)



Fonte: Adaptado de ABB SACE S.p.A (2007)

Onde:

I_k Corrente de curto-circuito de estado quase estacionário;

I_p Corrente de pico de curto-circuito;

T_k Tempo de duração do curto-circuito;

t_p Tempo da corrente de pico;

τ_1 Constante de tempo de subida; e

τ_2 Constante de tempo de decaimento.

A equação que descreve o comportamento da Figura 2.1 é definida abaixo:

Para ($t < t_p$):

$$i_1(t) = i_p \frac{1 - e^{(-t/\tau_1)}}{1 - e^{(-t_p/\tau_2)}} \quad (2.1)$$

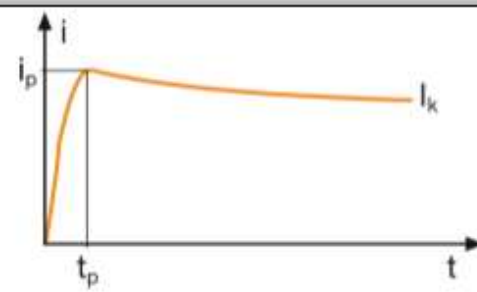
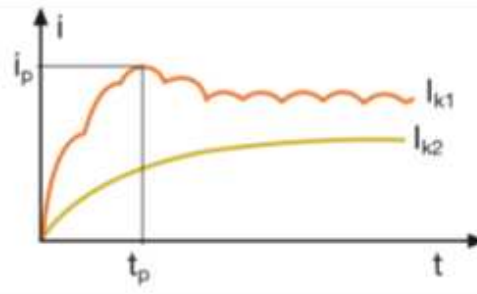
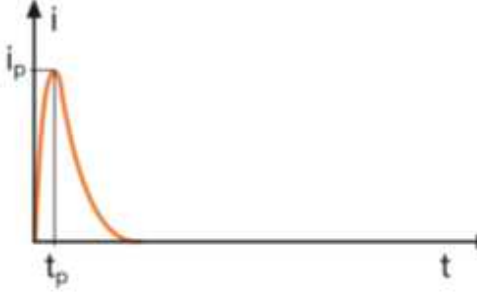
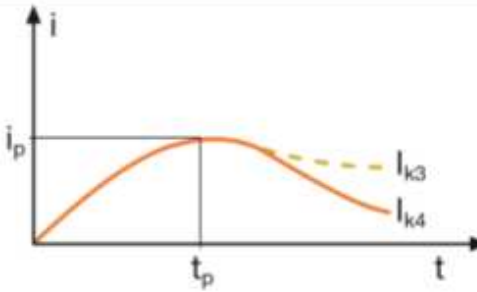
Para ($t \geq t_p$):

$$i_2(t) = i_p [(1 - \alpha)e^{(t-t_p)\tau_2} + \alpha] \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{I_k}{i_p} \quad (2.3)$$

A tabela 2.1 resume as fontes de curto-circuito CC consideradas na norma IEC 61660-1 (1997) e suas características relevantes.

Tabela 2.1 – Características das fontes de curto-circuito CC

Equipamento fonte de curto-circuito	Correntes de Curto-circuito e variações	Descrição
Bateria estacionária de chumbo-ácido		
Retificadores trifásico CA c/ conexões em ponte para 50Hz sem (I _{k1}) e com reator de alisamento (I _{k2})		I_k = Corrente de curto-circuito de estado quase estacionário i_p = Corrente de pico de curto-circuito
Capacitor de alisamento		t_p = Tempo da corrente de pico
Motores CC com excitação independente, sem massa adicional de inércia (I _{k4}) ou com massa adicional de inércia (I _{k3})		

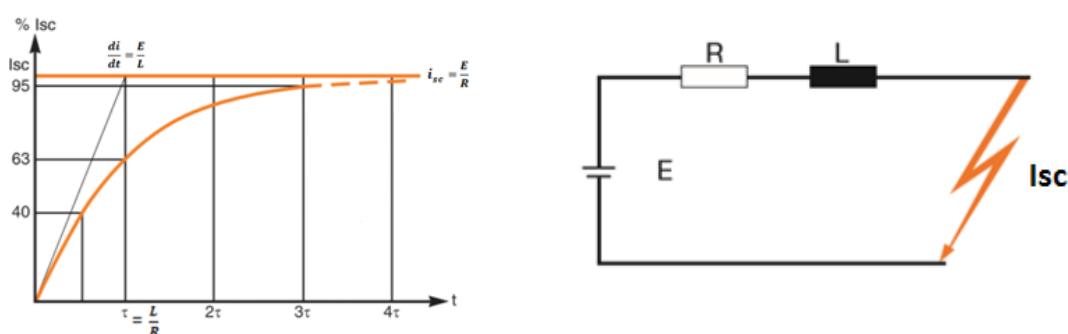
Fonte: Adaptado de ABB SACE S.p.A (2007)

A metodologia descrita na norma IEC 61660-1 (1997) necessita de um certo detalhamento das informações da instalação que nem sempre estão disponíveis. Uma alternativa simplificada é a utilização do método proposto pela General Electric (GE, 1978) e também adotado pela Schneider Electric (MOREL, 2000), onde a curva de curto-circuito é aproximada por uma simples exponencial (Figura 2.2). Uma comparação entre os resultados fornecidos pelas diferentes metodologias de cálculo é apresentada por Skare et al. (2009).

Figura 2.2 – Curva típica de um curto-circuito CC (ANSI/IEEE)

(a) Curva simplificada de curto-circuito

(b) Esquema de curto-circuito CC



Fonte: Adaptado de ABB SACE S.p.A (2007)

Onde:

$$i(t) = i_{sc} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \text{ [A]} \quad (2.4)$$

$$i_{sc} = \frac{E}{R} \text{ [A]} \quad (2.5)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ [s]} \quad (2.6)$$

Este esquema considera basicamente a resposta natural de um circuito predominantemente indutivo (RL) alimentado por um sinal contínuo.

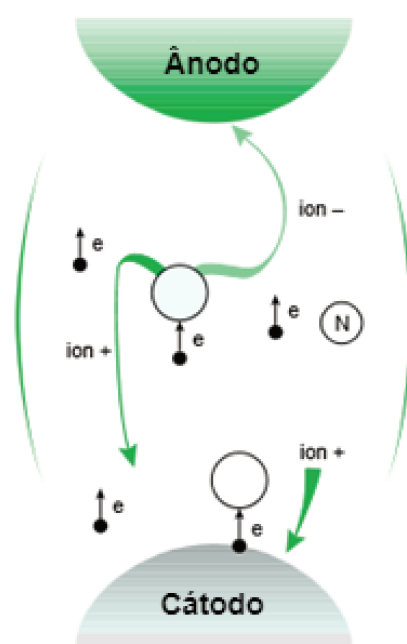
2.2 O Arco Elétrico

O arco elétrico é um fenômeno complexo causado por diversas interações físicas que acontecem durante sua formação, manutenção e interrupção, sendo caracterizado por ter uma duração normalmente curta, da ordem de poucas centenas de microssegundos. Ele desempenha um papel chave em dispositivos de proteção no processo de interrupção de correntes.

De acordo com Van Der Sluis (2001), o arco elétrico é definido como um canal de plasma que se forma após uma descarga de gás em um meio isolante. Quando os contatos dos disjuntores iniciam o processo de separação, a energia armazenada nas indutâncias do sistema de potência impede que o fluxo de corrente seja interrompido instantaneamente, forçando a passagem da corrente pelos contatos, que se dá por meio do rompimento da rigidez dielétrica do meio isolante. Estes contatos possuem uma área superficial reduzida, e à medida que se afastam, cria-se uma densidade de corrente elevada, fazendo com que o material dos contatos comece a derreter. A energia liberada por este processo causa a ionização do meio, dando origem a uma descarga no meio dielétrico, seja ele ar, óleo ou hexafluoreto de enxofre (SF₆).

O estado de plasma é alcançado com o aumento da temperatura, que fornece energia suficiente para que as moléculas se dissociem em átomos. Se a energia for suficientemente elevada, os elétrons presentes nos átomos se separam e ficam livres, produzindo íons positivos.

Figura 2.3 – Arco elétrico em meio gasoso

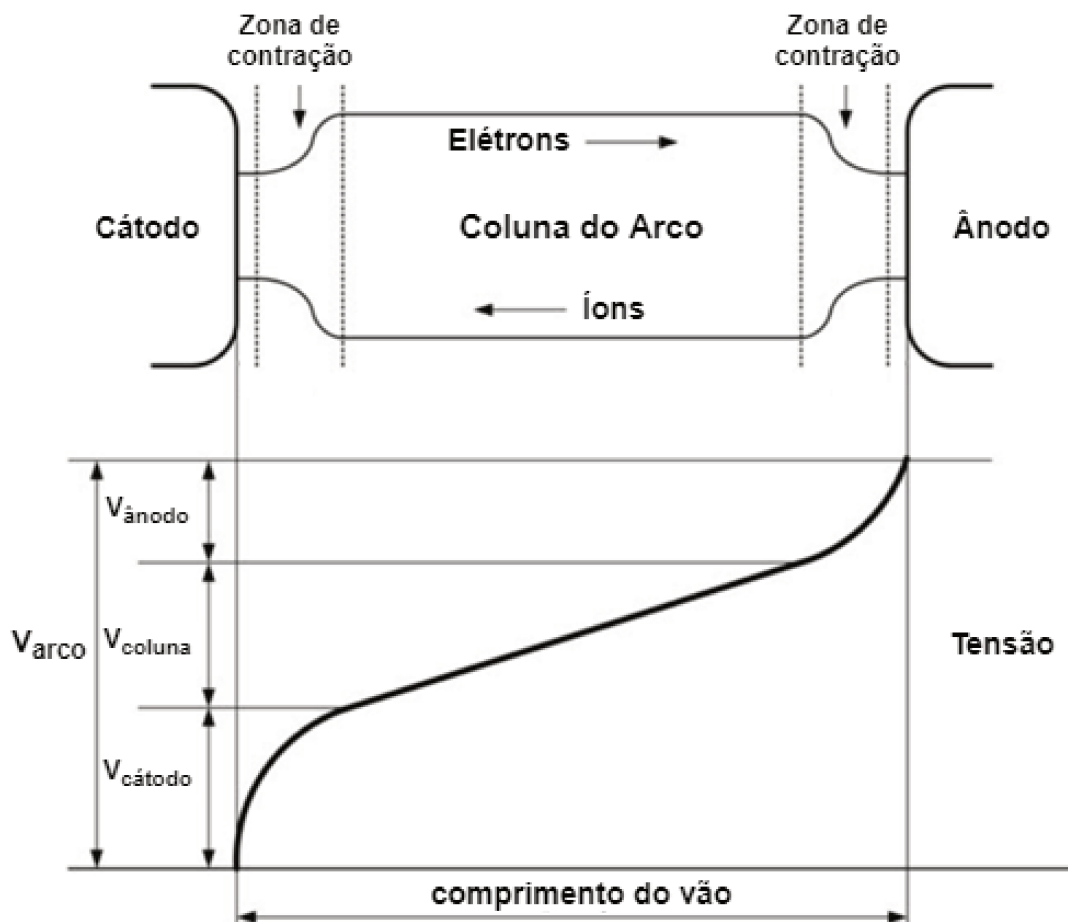


Fonte: Adaptado de Théoleyre (1999)

Segundo Slade (2017), o processo de formação do arco elétrico durante a abertura dos contatos de um disjuntor ocorre quando a corrente do circuito é maior do que um valor mínimo, e quando a tensão que aparece entre os contatos é também superior a um valor mínimo. Se estas condições forem satisfeitas, o arco elétrico sempre ocorrerá. A formação deste fenômeno depende integralmente das características do meio isolante e das propriedades dos materiais presentes nos contatos, e o arco sempre se inicia com o derretimento do metal dos contatos, produzindo vapor.

De forma geral, o arco elétrico pode ser dividido em três regiões - a coluna central, a região do cátodo e a região do ânodo, como mostra a Figura 2.4. A figura também mostra a distribuição típica de potencial ao longo do arco entre os contatos do disjuntor. Não existem espaços carregados na região central, e a corrente é mantida pelos elétrons, sendo que existe um balanço entre os elétrons e os íons positivos. Dependendo do meio dielétrico e da configuração da câmara de extinção do disjuntor, a temperatura na coluna do arco pode atingir picos entre 7000 e 25.000 K (MARTINEZ-VELASCO, 2017).

Figura 2.4 – Distribuição de potencial de acordo com as regiões do arco elétrico



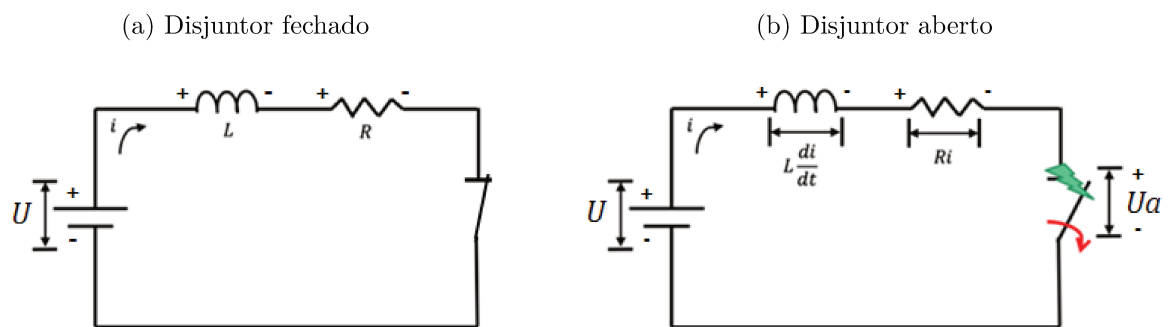
Fonte: Adaptado de Martinez-Velasco (2017)

2.3 Interrupção de Corrente CC

A corrente contínua é caracterizada por um fluxo de corrente cuja intensidade e direção permanecem constantes ao longo do tempo. Em outras palavras, os elétrons sempre fluem na mesma direção dentro de um circuito. Diferentemente dos sistemas CA, onde a corrente cruza naturalmente pelo zero a cada semiciclo, e o arco elétrico formado no processo de abertura do disjuntor pode vir a se extinguir naturalmente após a corrente se anular, a corrente em sistemas CC não decresce, e sim permanece constante em condição de operação normal. No entanto, durante a ocorrência de um defeito, em função da característica normalmente indutiva do sistema elétrico, a corrente apresenta uma característica exponencial de crescimento, tornando o processo de interrupção mais crítico.

Se tomarmos como exemplo o circuito da Figura 2.5a, a corrente em regime que circula quando o disjuntor está fechado é definida pela equação (2.7):

Figura 2.5 – Circuito exemplo



Fonte: Autor

$$i_0 = \frac{U}{R} \quad (2.7)$$

onde U é a tensão CC aplicada, e L e R são a indutância e a resistência do circuito. Adicionalmente, a energia armazenada no circuito é dada pela seguinte fórmula:

$$W_0 = \frac{1}{2} L i_0^2 \quad (2.8)$$

No momento em que o disjuntor é aberto ocorre uma mudança no circuito causada pelo surgimento do arco elétrico entre os contatos do disjuntor. Se incluirmos a

tensão gerada pelo arco (U_a) na equação do circuito:

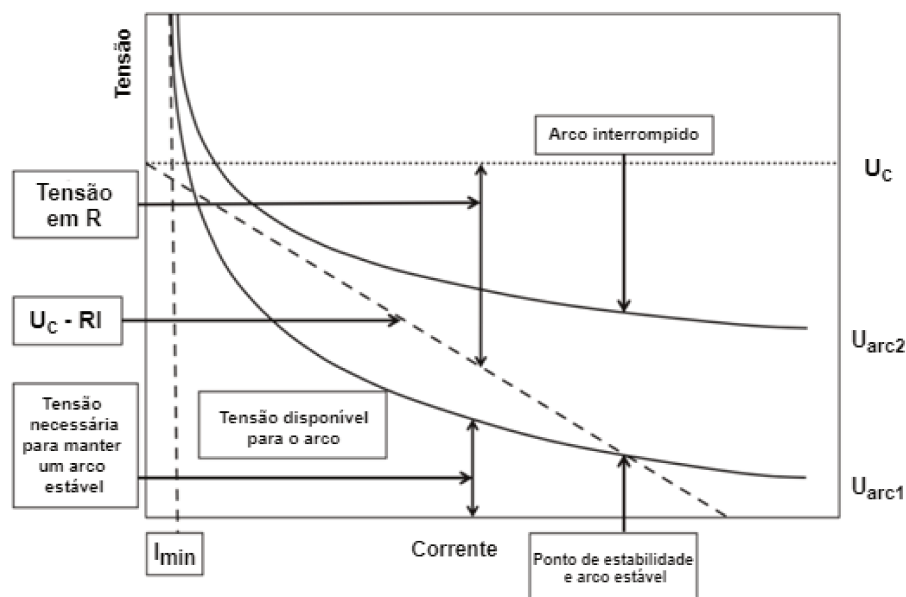
$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + U_a \quad (2.9)$$

Rearranjando a equação (2.9) e isolando o termo da derivada da corrente temos que:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U - Ri - U_a) \quad (2.10)$$

Antes da abertura dos contatos do disjuntor, $U = Ri$ e $U_a = 0$, logo $di/dt = 0$, ou seja, $U_L = 0$ (indutor encontra-se em curto-circuito). No instante em que a separação dos contatos se inicia, em $t = 0$, di/dt assume um valor negativo igual à $(-U_a/L)$, isto é, surge uma tensão de arco $U_a \neq 0$ entre os contatos do disjuntor que cresce ao longo do tempo, e a corrente começa a diminuir. Se em algum momento a parcela $(U - Ri)$ se torna igual à U_a , então di/dt se torna zero novamente, e a corrente para de reduzir. Neste momento o arco elétrico se torna estável. A Figura 2.6 mostra dois exemplos de curvas características de tensão e corrente para dois comprimentos de arco diferentes. A interseção entre as curvas U_{arc1} e $(U_C - Ri)$ representam pontos onde o arco elétrico é estável, e a curva U_{arc2} representa uma característica que garantiria a extinção do arco elétrico.

Figura 2.6 – Condições para um arco estável e para interrupção de um circuito CC



Fonte: Adaptado de Slade (2017)

Para que a interrupção de corrente em sistemas de corrente contínua ocorra é necessário tanto o estabelecimento do arco elétrico entre os contatos do disjuntor, como também deve ser garantido que a tensão de arco seja superior à tensão do sistema. Desta forma pode-se assegurar que a corrente no circuito será forçada à zero, e o restabelecimento do meio dielétrico será iniciado. A tensão do arco elétrico pode aumentar tanto pelo alongamento do arco, ou pelo resfriamento do mesmo.

2.3.1 Cálculo da corrente e energia do arco

Voltando ao circuito da figura 2.5b, será considerado que a corrente permanece constante desde o instante em que o disjuntor começa a abrir até o momento em que a tensão de arco atinge seu valor máximo. Isto consiste em assumirmos que é aplicado um degrau de tensão de valor U_a desde instante $t = 0$ até o momento em que a corrente é extinta em $t = t_a$. A resolução da equação diferencial 2.9 é dada a seguir:

$$i(t) = \frac{U - U_a}{R} + K_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (2.11)$$

onde $\tau = L/R$.

Aplicando o princípio da continuidade na corrente do circuito indutivo para calcular a constante K_0 , temos que a corrente no instante $t = 0^-$ deve ser igual à corrente no instante $t = 0^+$.

$$i(0^-) = i_0 = \frac{U}{R} \quad (2.12)$$

$$i(0^+) = i(t) = \frac{U - U_a}{R} + K_0 \quad (2.13)$$

Logo:

$$\frac{U}{R} = \frac{U - U_a}{R} + K_0 \quad (2.14)$$

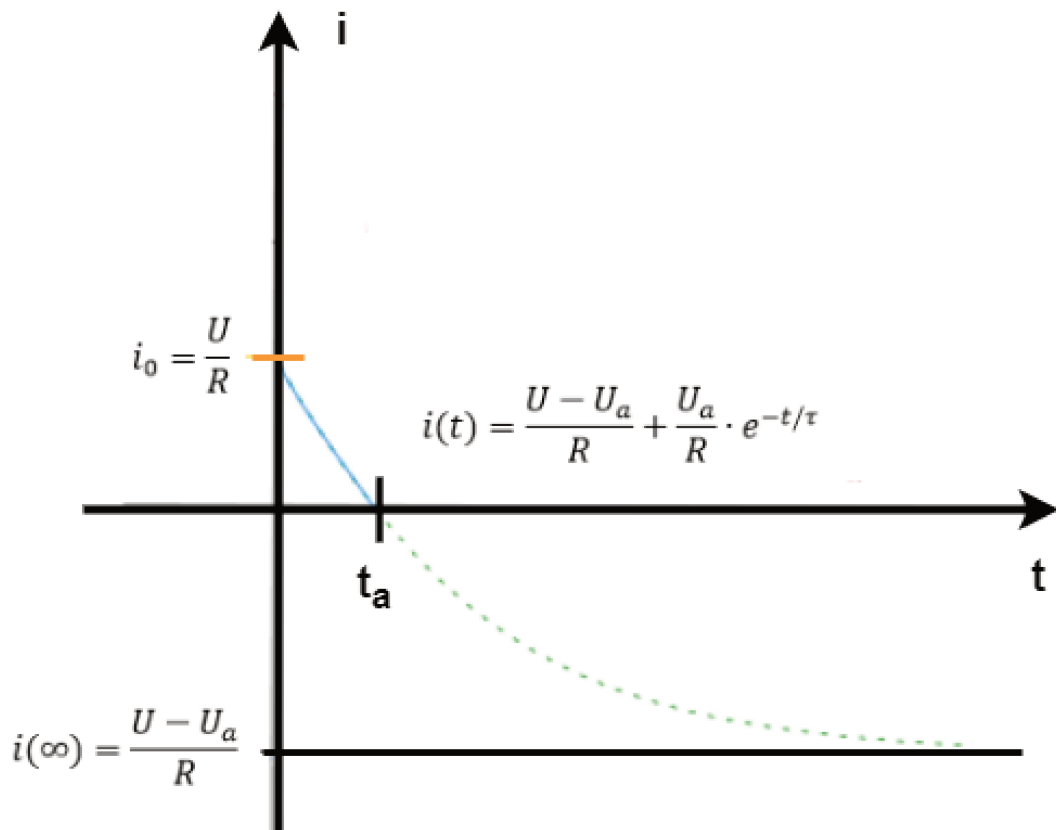
$$K_0 = \frac{U_a}{R} \quad (2.15)$$

Portanto, a solução da equação diferencial para $t > 0$ é:

$$i(t) = \frac{U - U_a}{R} + \frac{U_a}{R} \cdot e^{-t/\tau} \quad (2.16)$$

Como o segundo termo da equação tende à zero, podemos concluir que a corrente só será extinta se a tensão do arco (U_a) for maior do que a tensão da fonte (U):

Figura 2.7 – Tendência da interrupção de corrente CC



Fonte: Adaptado de ABB (2017)

O instante t_a representa o tempo de duração do arco, que é calculado como segue:

$$\frac{U - U_a}{R} + \frac{U_a}{R} \cdot e^{-t_a/\tau} = 0 \quad (2.17)$$

$$-\frac{t_a}{\tau} = \ln\left(\frac{U_a - U}{U_a}\right) \quad (2.18)$$

$$t_a = -\tau \cdot \ln\left(\frac{U_a - U}{U_a}\right) \quad (2.19)$$

$$t_a = \frac{L}{R} \cdot \ln\left(\frac{U_a}{U_a - U}\right) \quad (2.20)$$

E a energia dissipada pelo arco:

$$W_a = \int_0^{t_a} = U_a \cdot i(t) \cdot dt = U_a \int_0^{t_a} \left(\frac{U - U_a}{R} + \frac{U_a}{R} \cdot e^{-t/\tau} \right) \cdot dt \quad (2.21)$$

Resolvendo:

$$W_a = U_a L \frac{U}{R^2} \left[\ln \frac{U_a}{U_a - U} \cdot \left(1 - \frac{U_a}{U} \right) + 1 \right] \quad (2.22)$$

Multiplicando e dividindo por U e tendo em mente que $U/R = i_0$ e que $W_0 = 1/2Li_0^2$, a expressão (2.22) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$W_a = \frac{U_a}{U} \cdot L \cdot i_0^2 \left[\ln \frac{U_a}{U_a - U} \cdot \left(1 - \frac{U_a}{U} \right) + 1 \right] \quad (2.23)$$

$$W_a = W_0 \cdot \frac{U_a}{U} \cdot 2 \left[\ln \frac{U_a}{U_a - U} \cdot \left(1 - \frac{U_a}{U} \right) + 1 \right] \quad (2.24)$$

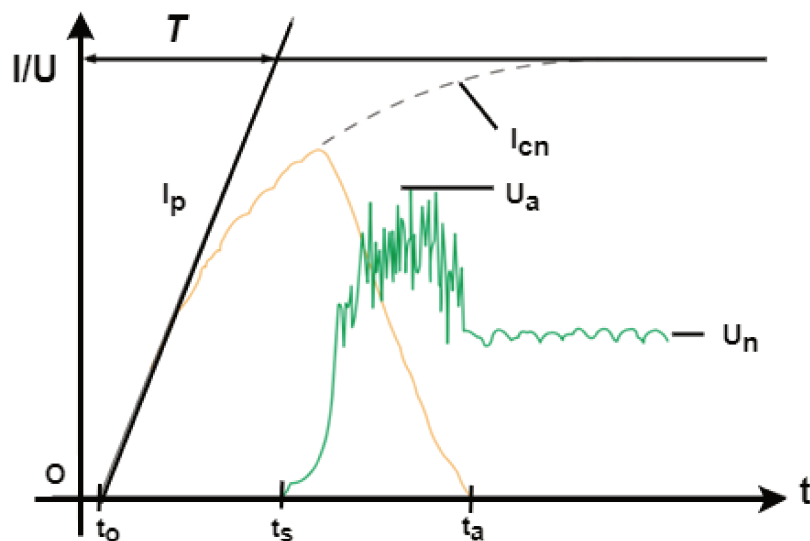
Portanto, de acordo com a teoria mostrada anteriormente, a interrupção da corrente só será bem sucedida se o arco elétrico produzido dentro do disjuntor tiver uma tensão superior à tensão da fonte e se o disjuntor também for capaz de suportar a energia do arco (W_a), que é função da energia do circuito W_0 (e, conseqüentemente, da indutância), e também da relação U_a/U .

A razão W_a/W_0 normalmente varia entre 1 e 1,5, sendo que quanto menor ela for, mais fácil será a interrupção da corrente (ABB, 2017).

2.3.2 Curvas típicas de curto-circuito

De forma geral, a corrente de curto-circuito em sistemas CC apresenta o formato típico mostrado na Figura 2.8, que representa um oscilograma relativo a um teste de curto-circuito realizado no laboratório de testes de potência ABB SACE S.P.A (2007).

Figura 2.8 – Curvas de curto-circuito de um teste realizado no ABB SACE



Fonte: Adaptado de ABB SACE S.p.A (2007)

Onde:

- I_p Corrente de curto-circuito;
- I_{cn} Corrente de curto-circuito sem abertura do circuito;
- U_a Tensão máxima do arco elétrico;
- U_n Tensão da fonte;
- T Constante de tempo;
- t_o Início do curto-circuito;
- t_s Início da separação dos contatos do disjuntor; e
- t_a Extinção da corrente de curto.

Quando ocorre o curto-circuito no instante t_o a corrente começa a aumentar de acordo com a constante de tempo do circuito, análogo à resposta natural de um circuito RL alimentado por um sinal CC. Em seguida, no instante t_s , os contatos do disjuntor começam a abrir, dando início ao surgimento do arco elétrico. A corrente continua subindo por alguns instantes após a separação dos contatos do disjuntor, até que ela começa a decrescer devido ao aumento da resistência do arco elétrico introduzida no circuito.

Como pode ser visto na Figura 2.8, a tensão do arco aumenta até um valor superior ao da fonte (curva verde), sendo que no tempo t_a a corrente de curto-circuito é completamente extinta.

2.4 Disjuntor CC

De acordo com a norma ABNT NBR IEC 60947-2 (2013), o disjuntor é um dispositivo de manobra e proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes sob condições normais de circuito (sob carga), assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado, e interromper correntes sob condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito.

Os disjuntores de corrente contínua podem ser divididos de acordo com as seguintes categorias (KONG, 2012):

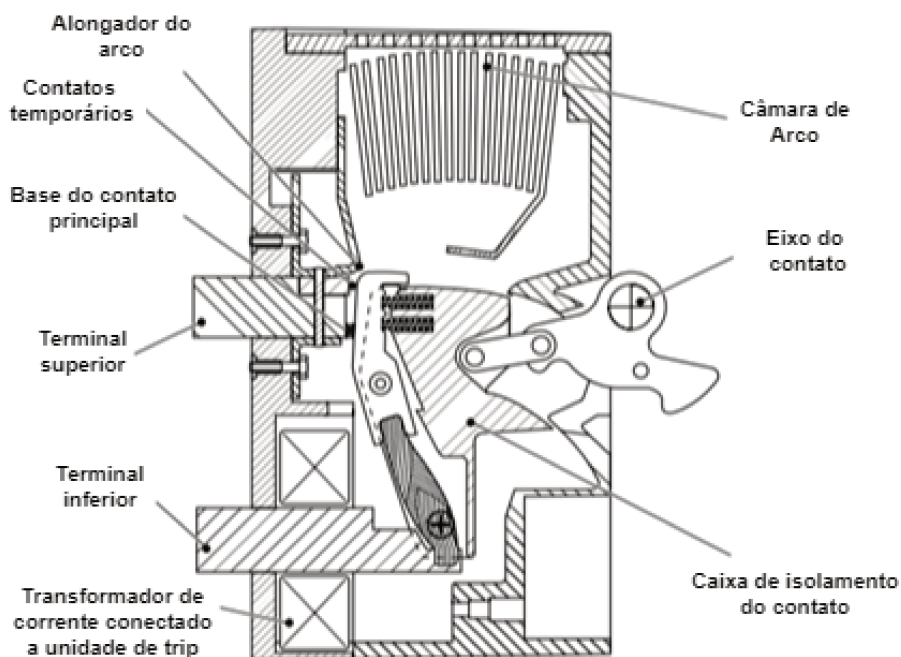
- Disjuntores eletromecânicos (extinção por arco elétrico)
 - Disjuntores a ar
 - Disjuntores a vácuo
 - Disjuntores a SF₆
- Disjuntores híbridos e de estado sólido
 - Disjuntores de estado sólido
 - Disjuntores híbridos (eletromecânicos e de estado sólido)

Embora o princípio básico de operação de todos os disjuntores seja similar, vários tipos de tecnologias foram desenvolvidas ao longo dos anos para diferentes condições de operação. Uma breve descrição das principais características destes disjuntores, de acordo com esse autor, é feita a seguir:

2.4.1 O Disjuntor a ar

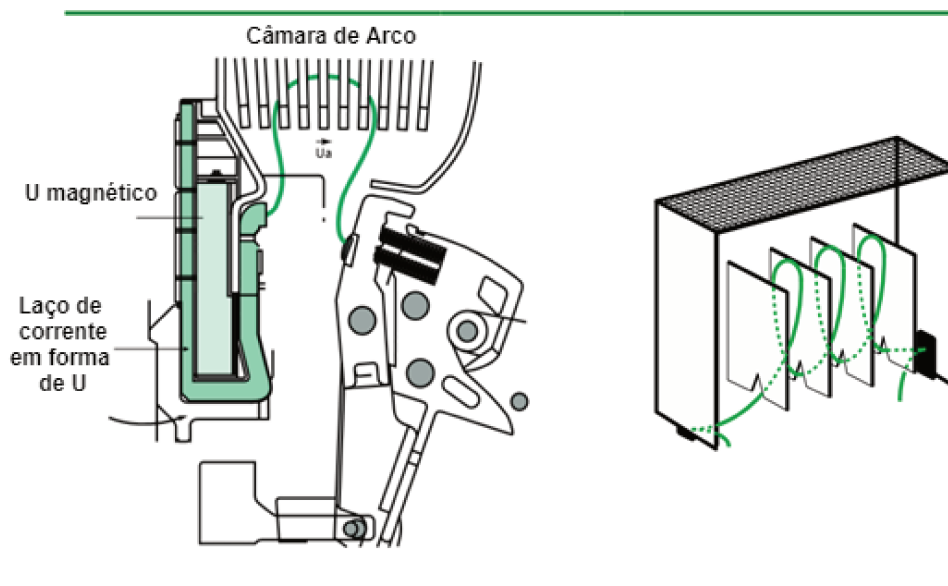
Os disjuntores a ar utilizam contatos eletromecânicos para fornecer o isolamento necessário, enquanto o arco elétrico gerado entre estes contatos ajuda no processo de interrupção de corrente, dissipando a energia armazenada nas indutâncias do circuito. Neste tipo de disjuntor o arco elétrico é forçado para uma câmara de extinção, onde ele é alongado e resfriado. Depois que a maior parte de sua energia é dissipada na forma de calor, o arco elétrico é extinto, deixando o circuito aberto. Este tipo de tecnologia é amplamente utilizada em sistemas de alta potência e baixa tensão, como sistemas ferroviários e aplicações navais, além de sistemas de baixa potência de baixa tensão, como os disjuntores de caixa moldada encontrados em sistemas residenciais e comerciais. A Figura 2.9 mostra a unidade de interrupção de corrente de um disjuntor de baixa tensão, com a câmara de extinção localizada na parte superior, e a Figura 2.10 mostra a dinâmica do alongamento do arco dentro da câmara de extinção durante o processo de interrupção de corrente.

Figura 2.9 – Unidade de interrupção do disjuntor Masterpact (Schneider)



Fonte: Adaptado de Morel (2000)

Figura 2.10 – Processo de interrupção de corrente no disjuntor a ar



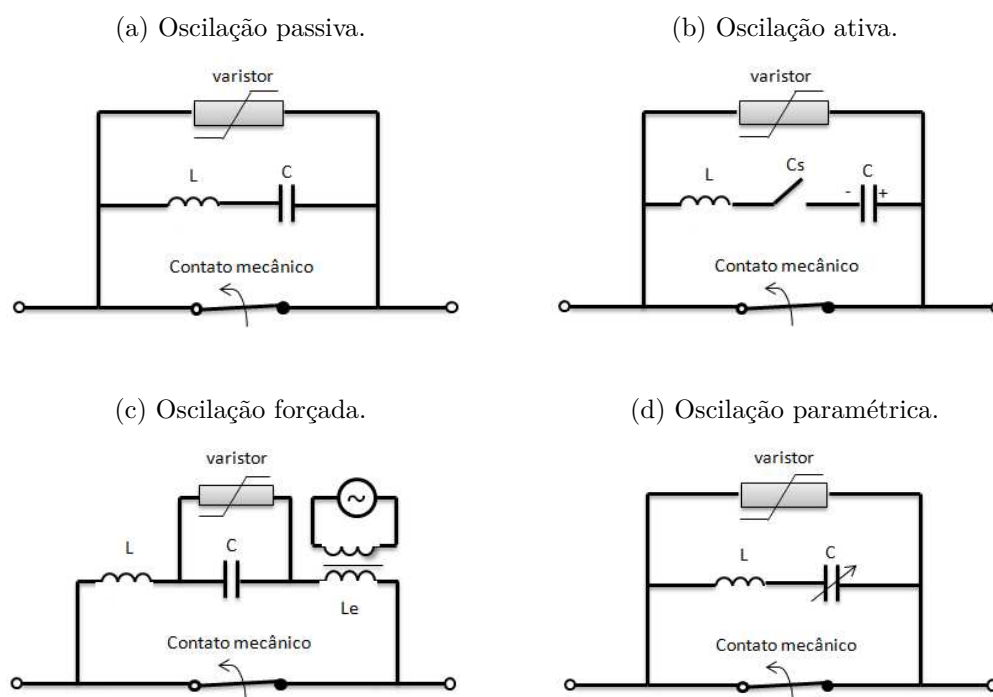
Fonte: Adaptado de Theoleyre (1999)

Os disjuntores a ar dotados de câmara de extinção são conhecidos como disjuntores de ação direta. Embora este tipo de interrupção seja ideal devido à sua capacidade de suportar altas tensões e também de dissipar a energia, existem limitações. A

tensão do arco elétrico deve ser sempre superior à tensão da fonte para que uma interrupção seja bem sucedida, o que leva ao aumento do tamanho da câmara de extinção, que nem sempre pode representar um bom custo-benefício. Por esta razão, estes disjuntores são amplamente utilizados em sistemas ferroviários e indústrias de baixa e média tensão, até 3600 V. Para tensões superiores a este valor outros métodos foram desenvolvidos para superar os limites descritos anteriormente (ABB, 2017).

Uma alternativa ao método direto é forçar o cruzamento da corrente pelo zero alterando os parâmetros do circuito, basicamente induzindo uma oscilação de amplitude apropriada. Existem duas categorias para este método de interrupção: oscilação auto-induzida (passiva) ou oscilação forçada (ativa). A Figura 2.11 mostra algumas das variações deste tipo de interrupção.

Figura 2.11 – Disjuntores a ar com interrupção por circuito oscilatório



Fonte: Autor

Na interrupção por oscilação passiva (Figura 2.11a), um circuito LC é conectado em paralelo com os contatos do disjuntor, enquanto que na oscilação ativa (Figura 2.11b), o capacitor encontra-se pré-carregado, necessitando assim de um sistema especial para carregá-lo, podendo utilizar até mesmo a própria tensão do circuito. A interrupção por oscilação ativa pode ainda ser forçada, quando ela é gerada por uma fonte externa ao circuito (Figura 2.11c), ou paramétrica, quando os parâmetros do circuito variam com uma frequência próxima à da frequência natural do circuito (Figura 2.11d). Além dos elementos

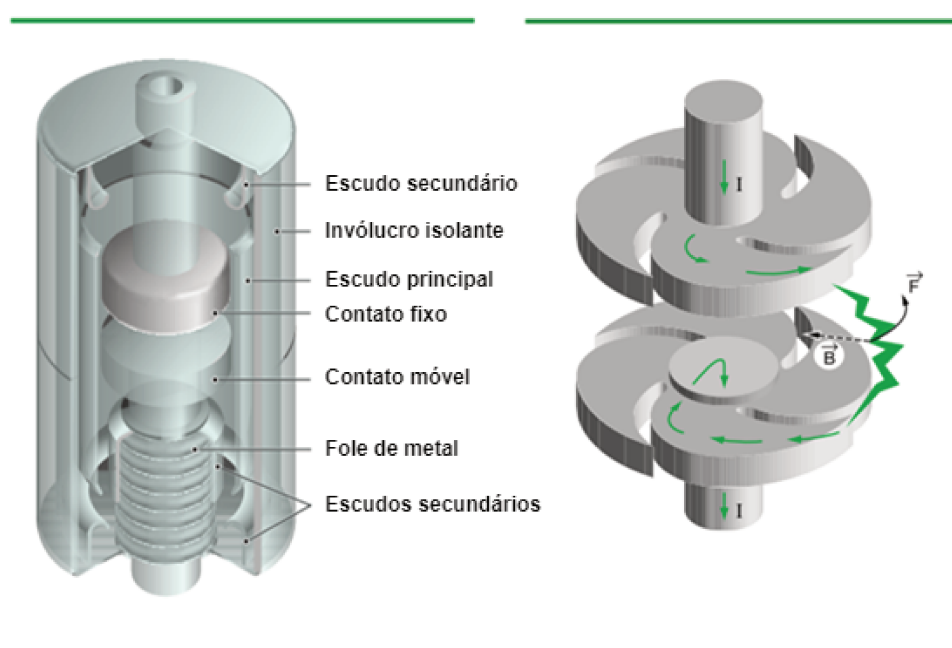
citados, temos ainda a inclusão do varistor, que tem por objetivo limitar a tensão máxima nos terminais do capacitor para seu valor de descarga.

Todos estes mecanismos apresentados possuem vantagens e desvantagens. A interrupção por oscilação passiva, por exemplo, não é adequada para interrupção de correntes elevadas, enquanto os outros métodos possuem componentes adicionais, acarretando no aumento da complexidade do equipamento (e perdas ativas no sistema). No caso da interrupção por oscilação paramétrica, existe ainda a dificuldade de calibrar o circuito, uma vez que ele só começa a oscilar na presença de determinadas condições (ABB, 2017).

2.4.2 O Disjuntor a vácuo

Nos disjuntores a vácuo, o contato eletromecânico e o arco elétrico estão fechados em um recipiente selado a vácuo. Como a constante dielétrica do vácuo é significativamente maior do que a da maioria dos materiais, é possível atingir um bom resultado na interrupção de corrente utilizando uma distância menor entre os contatos do disjuntor. Este tipo de disjuntor é bastante popular em aplicações de média tensão em CA devido ao seu tamanho compacto, baixa necessidade de manutenção e também ao baixo nível de ruído e operação silenciosa. Por outro lado, este tipo de tecnologia não é tão comum em sistemas CC de baixa tensão, sendo em sua maioria desenvolvidos por fabricantes japoneses para aplicação em sistemas de tração, como a Hitachi. A Figura 2.12 mostra a estrutura de um interruptor a vácuo e os detalhes de seus contatos.

Figura 2.12 – Estrutura de um disjuntor a vácuo e detalhes dos contatos



Fonte: Adaptado de Picot (2000)

2.4.3 O Disjuntor a ar comprimido

Estes disjuntores são semelhantes aos disjuntores a ar, com a diferença que eles utilizam ar comprimido para ajudar no resfriamento do arco elétrico, reduzindo o tamanho da câmara de extinção. Por outro lado, são necessários dispositivos para armazenar e comprimir o ar, sendo normalmente encontrados também um silenciador para reduzir o ruído durante a operação a níveis aceitáveis. Este tipo de disjuntor tem sido constantemente substituído por outras tecnologias, não sendo encontrados produtos comerciais para aplicação em sistemas CC de baixa tensão.

2.4.4 O Disjuntor a SF6

O hexafluoreto de enxofre (SF6) é um gás incolor, inodoro, não tóxico e não inflamável, com alta rigidez dielétrica. Quando usado em uma aplicação de disjuntor, esse gás geralmente é mantido compactado em um invólucro fechado que circunda o contato eletromecânico. Comparado ao ar atmosférico, a alta rigidez dielétrica do SF6 aumenta a tensão do arco, melhorando assim as propriedades de extinção do disjuntor.

Embora este tipo de equipamento seja popular em aplicações de alta tensão em CA, nenhum exemplo de disjuntor CC de baixa tensão com base nessa tecnologia é conhecido. Além disso, mesmo o SF6 sendo não tóxico e contido em um vaso de pressão, ele é muito mais pesado do que o ar; portanto, apresenta riscos de asfixia devido ao deslocamento do ar se ocorrer um vazamento em uma área fechada. Desta forma, a aplicação deste tipo de tecnologia em ambientes fechados é limitada.

2.4.5 Disjuntores híbridos e de estado sólido

Comparado às tecnologias discutidas anteriormente, o desenvolvimento dos disjuntores de estado sólido é relativamente recente. Os disjuntores de estado sólido substituem os contatos eletromecânicos por semicondutores para alcançar a interrupção de corrente e obter a abertura do circuito. Aproveitando as vantagens da alta velocidade de comutação e do aumento da capacidade de condução desenvolvidos nas últimas décadas, os disjuntores modernos conseguem produzir tempos de interrupção de algumas centenas de microssegundos, sendo muito vantajosos quando comparados aos disjuntores eletromecânicos que possuem tempos na casa dos milissegundos. Como não existe arco elétrico neste tipo de disjuntor, ele conta com dispositivos externos para dissipar a energia armazenada nas indutâncias do sistema. Para melhorar o desempenho, também foram desenvolvidas técnicas para permitir que estes disjuntores limitem a corrente de falta antes da interrupção final. Estes dispositivos possuem aplicações tanto em CA como em CC.

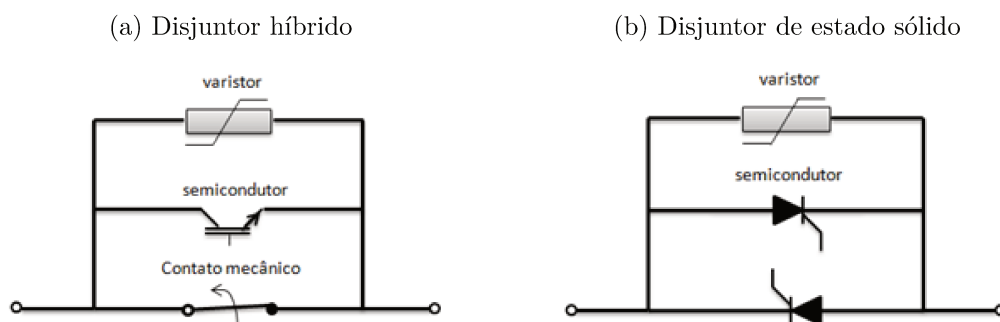
Embora os disjuntores de estado sólido possuam uma velocidade de operação muito maior do que os disjuntores eletromecânicos, eles também possuem uma grande

desvantagem que são as perdas elevadas durante todo o estado de condução. Para resolver este problema surgem os disjuntores híbridos, que utilizam uma combinação de disjuntor eletromecânico clássico e dispositivo semicondutor, para contornar o problema das perdas quando o disjuntor está fechado (no circuito). Em um disjuntor híbrido os contatos eletromecânicos são utilizados para conduzir a corrente quando o disjuntor está fechado (operação normal do sistema), e os dispositivos semicondutores são utilizados para reduzir ou eliminar o arco elétrico durante a interrupção de corrente.

Como o arco elétrico deve ser eliminado, outro mecanismo é necessário para dissipar a energia armazenada nas indutâncias do circuito. Isto geralmente é alcançado por meio do varistor, que possui uma característica de tensão/corrente não linear, fazendo com que sua resistência permaneça elevada (atuando efetivamente como um circuito aberto) até que a tensão entre seus terminais atinja um determinado valor, quando então sua resistência diminui e a corrente flui normalmente através do dispositivo. Quando está conduzindo, o varistor também limita a tensão a um valor constante. Este tipo de dispositivo é frequentemente usado em sistemas de alta tensão como o para-raios, e também como um dispositivo de proteção para componentes sensíveis à tensão.

Estes tipos de disjuntores ainda estão em grande parte na fase de pesquisa e desenvolvimento. Por esta razão existem poucos dispositivos comerciais que utilizam estas tecnologias. Esquemas típicos de disjuntores híbridos e de estado sólido são mostrados nas Figuras 2.13a e 2.13b, respectivamente.

Figura 2.13 – Exemplos de esquemas de disjuntores híbridos e de estado sólido



Fonte: Autor

2.4.6 Modelo de disjuntor escolhido

Neste trabalho será discutida a representação dos disjuntores eletromecânicos que utilizam o arco elétrico como forma de extinção da corrente. Dentre estes dispositivos, os disjuntores a ar dotados de câmara de extinção, ou seja, aqueles que possuem o mecanismo de supressão direta de corrente, são os mais utilizados em aplicações CC de

baixa e média tensão (até 3,6 kV). Os disjuntores eletromecânicos a ar são considerados pelos principais fabricantes como o estado da arte para equipamentos empregados nas condições mencionadas, tais como bondes, metrô, ferrovias leves urbanas e regionais, aplicações navais, dentre outros (ABB, 2017).

2.5 Modelos de Arco Elétrico

Nesta seção são apresentados os modelos matemáticos normalmente adotados na literatura para representação do efeito do arco elétrico. Resumidamente, pode-se dizer que os modelos de arco elétrico se dividem em modelos do tipo caixa-preta, modelos físicos e modelos empíricos, de acordo com a classificação adotada pelo CIGRÉ (1998). Uma descrição a respeito de tais modelos e suas formas de aplicação é apresentada a seguir:

Modelos do tipo caixa-preta descrevem o comportamento elétrico do arco por meio de formulações matemáticas e funções de transferência. São considerados modelos matemáticos baseados em considerações físicas que estabelecem a relação entre a condutância do arco elétrico com os parâmetros elétricos do circuito, como tensão e corrente do arco. Embora estes modelos não sejam adequados para o projeto de disjuntores, eles descrevem com boa precisão a interação do arco elétrico com o circuito, sendo uma ferramenta de grande utilidade em simulações de circuitos elétricos.

Modelos físicos do arco elétrico incluem explicitamente os processos físicos e seus detalhes, calculando o comportamento global do arco a partir das leis de conservação de massa, da quantidade de movimento e da energia, levando em consideração as propriedades do gás e do plasma, além de modelos mais ou menos detalhados de troca de energia (troca de calor por condução, turbulência, convecção e radiação). Estes modelos são comumente utilizados por fabricantes de disjuntores no projeto de seus equipamentos, incluindo na formulação de tais modelos a pressão do sopro de gás aplicada, e também o formato da câmara de extinção, visando assim diminuir custos com protótipos.

Modelos empíricos utilizam diagramas e fórmulas que descrevem a dependência de parâmetros e suas leis de crescimento para casos específicos, tais como curvas-limite de curto-circuito para falta quilométrica, comportamento da corrente de "chopping" com a capacitância paralela e outros. Estes modelos derivam de testes ou de cálculos e simulações utilizando os outros modelos.

Neste trabalho serão detalhados os modelos do tipo caixa-preta, cujo foco está na representação do fenômeno do arco elétrico por meio de variáveis de circuito durante o

processo de interrupção de corrente, sem entrar no detalhamento físico do processo.

2.5.1 Modelos do tipo caixa-preta

A maioria dos modelos do tipo caixa-preta utilizados atualmente remetem aos trabalhos desenvolvidos por Cassie (1939) e por Mayr (1943), sendo considerados por muitos como os representantes desta categoria. Os modelos desenvolvidos posteriormente baseiam-se em um destes modelos ou na combinação deles.

As primeiras modificações dos modelos de Cassie e Mayr utilizam suas equações originais, embora possuam aplicações limitadas no processo de interrupção de corrente. Estes modelos se baseiam na validade das equações originais em diferentes intervalos de tempo. Em 1948, Browne formulou um modelo combinando as equações de Cassie e Mayr nas regiões antes do cruzamento da corrente por zero, e após o cruzamento da corrente por zero, respectivamente (BROWNE, 1948). Em 1978, Frost também utilizou uma combinação destas equações, mas adicionou uma mudança na equação de Cassie para descrever o arco elétrico após o instante de reignição térmica (FROST, 1978).

Os modelos combinados foram utilizados pelos autores para descrever o comportamento do arco elétrico em disjuntores de SF₆. Eles apresentam dois parâmetros livres, e conseqüentemente, a sua capacidade de se adaptar a experimentos reais é semelhante à capacidade dos modelos originais, sendo o principal fator de restrição para aplicação dos mesmos.

Em seguida surgiram os modelos com mais de dois parâmetros, com objetivo de obter uma melhor representação de experimentos reais e também um maior detalhamento dos processos físicos descritos por eles. Em 1966, Rieder e Urbanek incluíram a influência do campo elétrico nos efeitos de não equilíbrio do arco elétrico (RIEDER; URBANEK, 1966), sendo que posteriormente, Urbanek ainda incluiu um parâmetro adicional para caracterizar os efeitos da tensão de ruptura do arco. Este foi o primeiro modelo a considerar a ruptura do dielétrico nas equações do arco (URBANEK, 1972). Outra formulação foi desenvolvida por Schwalb, adotando um modelo de cinco parâmetros (SCHWALB et al., 1978), sendo posteriormente modificada por Portela na criação de um novo modelo (PORTELA, 1980).

Estes modelos apresentaram melhorias em relação aos modelos originais, e levaram portanto, a um melhor desempenho na representação de experimentos reais. No entanto, os modelos de parâmetros constantes descrevem o comportamento do arco com funções matemáticas estritamente definidas, e nem sempre apresentam a precisão adequada para todos os casos.

Em 1971, Schwarz apresenta um modelo modificado de Mayr, considerando

os parâmetros da constante de tempo e da potência de resfriamento como dependentes da condutância do arco (SCHWARZ, 1971), sendo considerado como um dos principais modelos que representam os parâmetros do arco por meio de funções. Em 1992, Van der Sluis, Rutgers e Koreman desenvolvem um modelo modificado, a partir do modelo de Mayr, onde a potência de resfriamento é dependente da corrente (SLUIS; RUTGERS; KOREMAN, 1992).

Uma extensão da modelagem do arco elétrico é obtida através da utilização de mais de um conjunto de parâmetros ou funções para representar o comportamento do arco. Se considerarmos que a resistência do arco pode ser vista como o valor da integral obtida pela soma das resistências ao longo da coluna do arco, e que geralmente o arco é não homogêneo na região axial, especialmente nas proximidades do contato do disjuntor (terminais do arco), torna-se conveniente a divisão do arco em seções independentes. Por este motivo, foram desenvolvidos modelos que levam em consideração a existência de dois ou mais arcos em série, onde cada arco é representado por uma equação com parâmetros diferentes (Cigré Working Group 13.01, 1998).

Em 1993, Habedank apresenta o seu modelo, que consiste na combinação das condutâncias calculadas pelos modelos de Cassie e Mayr colocadas em série (HABEDANK, 1993). Desta forma o modelo proposto por Habedank concilia as vantagens do modelo de Cassie para representação da região de correntes elevadas, com as vantagens do modelo de Mayr, que melhor representa a região de correntes próximas de zero. Seguindo com os modelos de arco em série, vale ressaltar o modelo proposto por Portela, que é constituído por dois arcos em série ou em paralelo (PORTELA et al., 1992), além do modelo proposto por Smeets e Kertész, que é composto por três arcos em série, conhecido como modelo de KEMA (SMEETS; KERTÉSZ, 2000).

De uma forma geral, os modelos com vários arcos em série acarretam no aumento da ordem do sistema de equações diferenciais, aumentando, portanto, o grau de complexidade do problema. Neste trabalho serão detalhados os principais modelos dentre aqueles descritos anteriormente, dando foco aos modelos que foram mais exaustivamente trabalhados na literatura técnica. Uma revisão mais detalhada dos modelos de arco elétrico e suas diferentes formas de apresentação pode ser obtida em Cigré Working Group 13.01 (1998).

2.5.2 Modelo do arco de Cassie

O primeiro modelo de arco elétrico utilizando equações diferenciais foi proposto por Cassie (1939), que descreve o comportamento do arco elétrico por meio da mudança de sua condutividade devido às variações do fluxo de calor no mesmo. Cassie assume que o arco elétrico está confinado em um canal com temperatura, densidade de corrente e intensidade de campo elétrico constantes, sendo que as perdas de energia se dão exclusivamente

por convecção. São introduzidas duas constantes associadas ao arco: a tensão de arco estacionária u_0 e a constante de tempo τ_c , que representa a inércia térmica do arco elétrico. As premissas adotadas por Cassie são:

- Temperatura constante na direção radial;
- Resfriamento do arco por convecção na direção axial; e
- Área da seção transversal do arco variável.

O modelo de Cassie é representado pela seguinte equação:

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{u_0^2} - 1 \right) \quad (2.25)$$

onde:

g_c	condutância do arco de Cassie [S]
τ_c	constante de tempo do arco [s]
u	tensão do arco elétrico [V]
u_0	tensão constante do arco em equilíbrio [V]

Como a equação de Cassie corresponde, aproximadamente, a supor que o campo elétrico longitudinal na região de arco é constante e que a alteração da condutância do arco está associada a uma alteração proporcional da respectiva seção transversal, ela é normalmente associada a correntes de arco elevadas (CÂMARA, 2010), não sendo adequada para representação de baixas correntes (próximas de zero).

2.5.3 Modelo do arco de Mayr

Outro autor conhecido por seus trabalhos sobre arco elétrico, Mayr também desenvolveu um modelo matemático baseado em equações diferenciais (MAYR, 1943), porém com premissas diferentes das adotadas por Cassie. Mayr assumiu que o arco é resfriado exclusivamente pelo ar, ou seja, a radiação é levada em consideração explicitamente, e que a troca de calor ocorre por condução térmica (CÂMARA, 2010). O modelo de Mayr considera duas constantes associadas ao arco: a potência de resfriamento P_0 e a constante de tempo do arco τ_m . As premissas adotadas por Mayr são:

- Área da seção transversal do arco constante (raio constante);
- Perdas de calor por condução no sentido radial; e

- Potência retirada do arco constante.

A equação de Mayr é mostrada a seguir:

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (2.26)$$

onde:

g_m	condutância do arco de Mayr [S]
τ_m	constante de tempo do arco [s]
u	tensão do arco elétrico [V]
i	corrente do arco elétrico [A]
P_0	potência de resfriamento do arco [W]

O modelo proposto por Mayr admite que a perda por calor ocorre por condução térmica no sentido radial, com a condutância do arco variando exponencialmente com a energia armazenada (ZANETTA JR., 2003). Devido às premissas adotadas por Mayr, este modelo se mostrou mais adequado para correntes pequenas (próximas de zero).

2.5.4 Modelo do arco de Habedank

Tomando como base os trabalhos feitos por Cassie e Mayr, e com o objetivo de representar uma região de corrente mais ampla, Ulrich Habedank apresentou seu modelo combinado, que consiste na conexão em série das resistências de Cassie e de Mayr (HABEDANK, 1993). Desta forma, para correntes elevadas, a resistência do arco é representada majoritariamente pela parcela de Cassie, enquanto que para correntes de baixa magnitude, a contribuição do modelo de Mayr é predominante. Utilizando a lei de Ohm ($i = g.v$), podemos reescrever as equações (2.25) e (2.26) em função da corrente:

Cassie:

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{i^2}{u_0^2 g_c^2} - 1 \right) \quad (2.27)$$

Mayr:

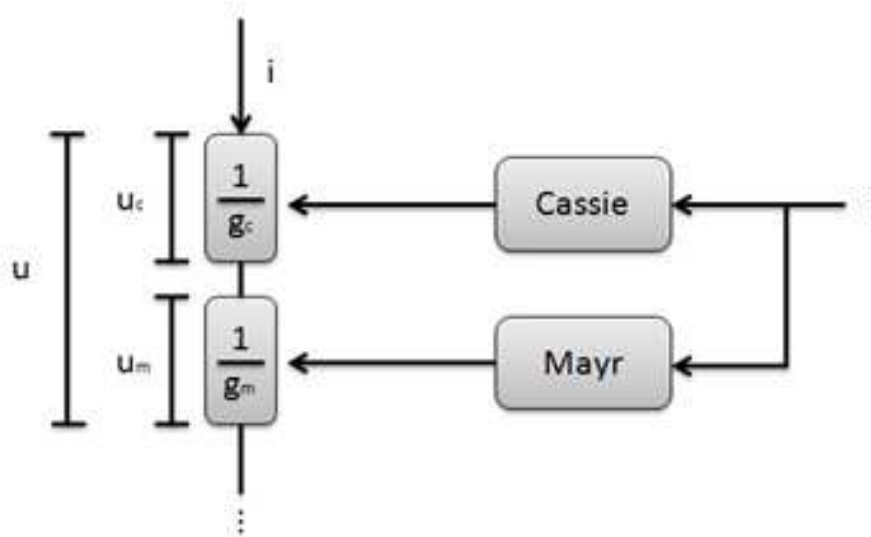
$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i^2}{P_0 g_m} - 1 \right) \quad (2.28)$$

Habedank:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (2.29)$$

Em julho de 1995, Bizjak e Zunko apresentaram um modelo de disjuntor para simulação em programas computacionais combinando os modelos de Cassie e de Mayr (BIZJAK; ZUNKO, 1995). A Figura 2.14 apresenta o diagrama de blocos do modelo utilizado.

Figura 2.14 – Diagrama de blocos do modelo proposto por Habedank



Fonte: Adaptado de Bizjak e Zunko (1995)

2.5.5 Modelo do arco de Schwarz

Os trabalhos de Cassie e Mayr foram pioneiros na pesquisa da modelagem do arco elétrico, no entanto ainda lhes faltava uma boa precisão para representar oscilografias obtidas de experimentos. Conseqüentemente, diversas modificações e melhorias foram propostas na literatura para os modelos de caixa-preta, sendo que em 1971, J. Schwarz propôs a introdução de uma dependência da condutância nas expressões da constante de tempo e da potência de resfriamento (SCHWARZ, 1971). Devido a sua capacidade de se adaptar a dados experimentais, diversos autores também adotaram esta premissa, tais como Avdonin (1980) e Thiel (1979).

As funções que definem a relação entre a constante de tempo e a potência de resfriamento em função da condutância são definidas da seguinte forma:

$$\tau(g) = \tau_0 g^\alpha \quad (2.30)$$

$$P(g) = P_0 g^\beta \quad (2.31)$$

Incluindo as equações (2.30) e (2.31) na equação de Mayr (2.26):

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{u \cdot i}{P(g)} - 1 \right) \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^\alpha} \left(\frac{u \cdot i}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (2.33)$$

O modelo de Schwarz possui quatro parâmetros:

τ_0 constante de tempo do arco

P_0 potência de resfriamento do arco

α expoente da condutância na expressão da constante de tempo do arco

β expoente da condutância na expressão da potência de resfriamento

É importante ressaltar que os modelos de Cassie e de Mayr podem ser obtidos a partir de casos especiais do modelo de Schwarz. O modelo de Mayr pode ser obtido removendo a dependência das constantes em relação a condutância, ou seja, fazendo as constantes $\alpha = \beta = 0$, resultando assim na equação (2.26), enquanto que o modelo de Cassie pode ser obtido considerando $\alpha = 0$ e $\beta = 1$, e identificando τ_c e u_0^2 da equação (2.25) com as constantes τ_0 e P_0 da equação (2.33). Embora esta última consideração não seja frequentemente abordada, ela é fundamental, uma vez que o modelo de Schwarz representa um aperfeiçoamento do ponto de vista matemático tanto do modelo de Mayr quanto do modelo de Cassie, mesmo que estes modelos tenham sido obtidos por meio de considerações físicas diferentes. Como consequência, o modelo de Schwarz apresenta uma melhor capacidade de adaptação a medições de oscilografia quando comparado aos modelos de Cassie e Mayr. Por exemplo, se um determinado oscilograma pode ser representado com um bom grau de precisão pelos modelos de Cassie ou Mayr, então o modelo de Schwarz deve apresentar uma precisão igual ou superior a estes modelos, enquanto a consideração inversa não é verdadeira (GHEZZI; BALESTRERO, 2010).

2.6 Métodos de Identificação dos Parâmetros do Arco Elétrico

A aplicação de uma técnica de modelagem de arco elétrico consiste nas seguintes etapas: (1) escolher o modelo de arco elétrico; (2) realizar testes e medições de tensão e corrente durante o período de interação do arco elétrico com o circuito; (3) avaliar os parâmetros do modelo do arco elétrico; e (4) simular computacionalmente o processo de interrupção. Com relação à aplicação prática do modelo de arco selecionado, temos ainda duas etapas principais (MARTINEZ-VELASCO, 2017):

1. **Determinação dos parâmetros:** Testes de campo fornecem os dados das curvas de tensão e corrente do arco. A análise dos resultados é baseada na equação do modelo escolhido tendo em vista as funções dos parâmetros. O objetivo principal desta análise é avaliar os parâmetros do modelo de arco.
2. **Simulação numérica:** A interação entre o circuito e o arco elétrico é calculada para diversas condições do sistema por meio de simulações usando o modelo do arco.

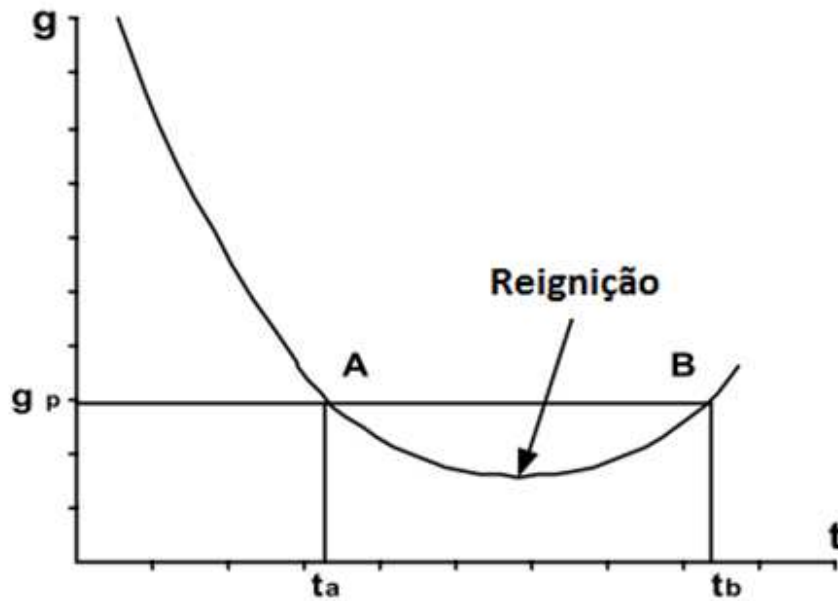
Esta seção apresenta uma breve descrição de alguns dos métodos presentes na literatura utilizados para estimar os parâmetros dos modelos de arco elétrico na simulação de disjuntores. Alguns destes métodos foram desenvolvidos inicialmente para corrente alternada, e devido a particularidades em suas aplicações, não é possível utilizar em sistemas de corrente contínua.

2.6.1 Método de Amsinck

Este método foi proposto por Amsinck (1977) e se aplica na determinação dos parâmetros do arco elétrico somente nos casos onde, durante um ensaio do disjuntor, ocorre a interrupção de corrente seguida de uma reignição. Amsinck assume que a potência de resfriamento $P(g)$ e a constante de tempo $\tau(g)$ são iguais em pontos de mesma condutância (GIMENEZ, 2003).

Para determinação dos parâmetros do arco elétrico, utilizam-se os oscilogramas de tensão e corrente do arco desde alguns instantes antes do cruzamento da corrente por zero até alguns instantes após o cruzamento da corrente por zero. Estes oscilogramas são utilizados para criar a curva de condutância ($g = i/v$), para então aplicar a equação do arco para os pontos de mesma condutância, destacados como t_a e t_b na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Representação gráfica do método de Amsink



Fonte: Adaptado de Rodríguez-Medina et al. (2003)

Aplicando a equação de Schwarz nos pontos t_a e t_b e considerando que a potência de resfriamento e a constante de tempo são funções da condutância, temos:

$$g'_A = \frac{1}{\tau(g_p)} \left(\frac{i_A^2}{P(g_p)} - g_p \right) \quad (2.34)$$

$$g'_B = \frac{1}{\tau(g_p)} \left(\frac{i_B^2}{P(g_p)} - g_p \right) \quad (2.35)$$

onde:

$$g'_A = \left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_a} \quad e \quad g'_B = \left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_b} \quad (2.36)$$

e:

$$i_A = i(t_a) \quad e \quad i_B = i(t_b) \quad (2.37)$$

Resolvendo o sistema de equações (2.34) e (2.35) para o ponto g_p temos:

$$P(g_p) = \frac{g'_A i_B^2 - g'_B i_A^2}{g_p (g'_A - g'_B)} \quad (2.38)$$

$$\tau(g_p) = \frac{g_p (i_B^2 - i_A^2)}{i_A^2 g'_B - i_B^2 g'_A} \quad (2.39)$$

O método descrito calcula somente um par de valores $P(g_P)$ e $\tau(g_P)$ em função da condutância, logo este processo deve ser repetido para diferentes valores de g_P para obter as curvas de $P(g_P)$ e $\tau(g_P)$. A partir das curvas é possível fazer uma regressão para estimar os valores das constantes P_0 , τ_0 , α e β .

2.6.2 Método de Rijanto

Já o método proposto por Rijanto (1974) se baseia na equação de Schwarz, e parte das seguintes considerações:

$$\frac{g'}{g} = \frac{1}{\tau(g)} \left(\frac{u \cdot i}{P(g)} - 1 \right) \quad (2.40)$$

Fazendo $g' = 0$, tem-se que $u \cdot i = P(g)$. Logo, se o circuito não entrega potência ao arco, ou seja, se $u \cdot i = 0$, é porque $i = 0$, e portanto:

$$\frac{g'}{g} = -\frac{1}{\tau(g)} \quad e \quad \tau(g) = -\frac{g}{g'} \quad (2.41)$$

A obtenção dos parâmetros do arco se resume a encontrar pontos de passagem pelo zero, e de máximo e mínimo de g ($g' = 0$), podendo-se determinar separadamente os valores da constante de tempo e da potência de resfriamento. Para tanto, se utiliza um circuito sintético de injeção de corrente de alta frequência sobre a corrente de curto-circuito (semelhante ao ensaio de curto-circuito), obtendo-se assim zeros de corrente e pontos onde $g' = 0$ da seguinte maneira:

No instante t_1 (coincidente com um ponto de máximo da corrente total), tem-se:

$$\rightarrow g' = 0 \quad \therefore \quad P(g) = i(t_1)u(t_1) \quad (2.42)$$

onde $g(t_1) = i(t_1)/u(t_1)$.

No instante t_2 (coincidente com o zero da corrente total), tem-se:

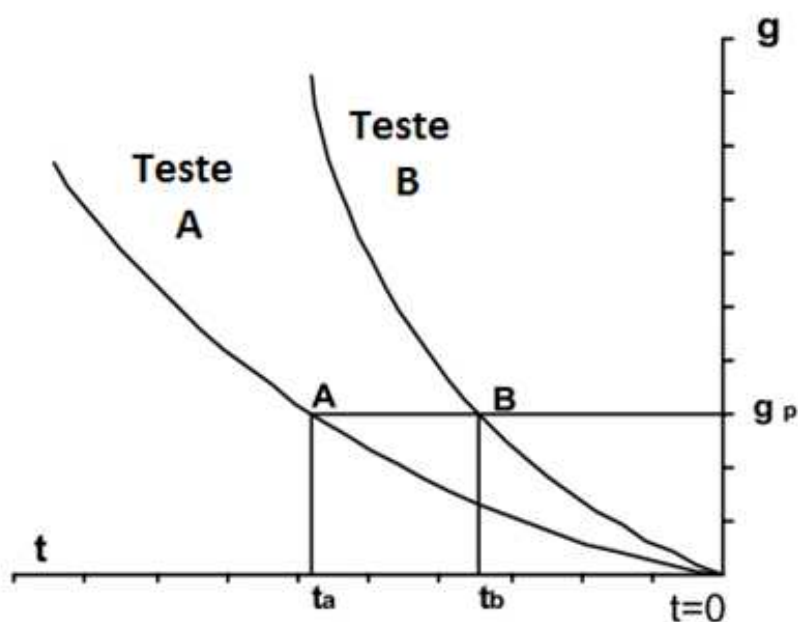
$$\rightarrow i = 0 \quad \therefore \quad \tau(g_2) = -\frac{g_2}{g'_2} \quad (2.43)$$

É possível observar que para uma determinada corrente de alta frequência, pode-se determinar um par de valores de $\tau(g)$ e $P(g)$ para um conjunto de valores de g e g' . Mudando-se o instante de injeção de corrente e a frequência do circuito sintético, determinam-se outros pontos, possibilitando a obtenção das curvas de $\tau(g)$ e $P(g)$ por meio de uma regressão.

2.6.3 Método Generalizado (para 2 ensaios)

Este método pode ser considerado como uma generalização do método de Amsinck. Ele se baseia na determinação dos parâmetros do arco utilizando ensaios distintos de um mesmo disjuntor e sob mesmas condições de teste, com ou sem reigitação térmica. A Figura 2.16 mostra as curvas de condutância para dois testes distintos de um mesmo disjuntor.

Figura 2.16 – Representação do método generalizado



Fonte: Adaptado de Rodríguez-Medina et al. (2003)

Considerando o mesmo modelo de arco utilizado anteriormente e aplicando aos pontos A e B para uma mesma condutância g_P , pode-se chegar nas mesmas equações para a potência de resfriamento $P(g_P)$ e constante de tempo $\tau(g_P)$ encontrados em (2.38) e (2.39). Assim como no método de Amsinck, este processo deve ser repetido para vários pontos de forma a obter as curvas de $P(g_P)$ e $\tau(g_P)$ e, conseqüentemente, os parâmetros do modelo de arco via regressão numérica.

2.6.4 Método de Ruppe

O método desenvolvido por Ruppe (1980) se baseia no princípio de que se $P(g)$ e $\tau(g)$ são funções da condutância, então eles devem possuir o mesmo comportamento para diferentes arcos sob condições similares. Por este motivo, são necessários vários testes do mesmo dispositivo sob mesmas condições.

Considerando novamente o modelo de Schwarz, e reescrevendo a equação (2.33) isolando o produto ($u \cdot i$):

$$u \cdot i = P(g) \left(\frac{dg/dt}{g} \tau(g) - 1 \right) \quad (2.44)$$

Então a equação pode ser escrita como:

$$u \cdot i = f \left(\frac{g'}{g} \right) \quad (2.45)$$

A equação (2.45) é similar a equação de uma reta do tipo $y = mx + b$, onde ($u \cdot i$) é a variável dependente e (g'/g) é a variável independente. O produto $P(g) \tau(g)$ representa o coeficiente m , relativo a inclinação da reta, e a interseção da reta com os eixos x e y pode ser descrita pelas seguintes equações:

Interseção com o eixo x:

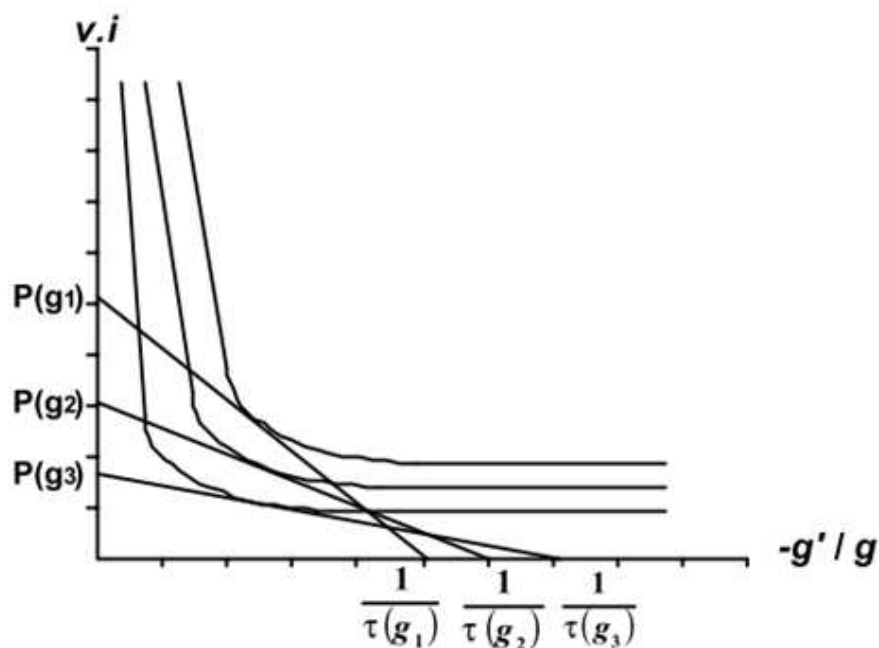
$$\rightarrow u \cdot i = 0 \quad \therefore \frac{1}{\tau(g)} = -\frac{g'}{g} \quad (2.46)$$

Interseção com o eixo y:

$$\rightarrow -\frac{g'}{g} = 0 \quad \therefore P(g) = u \cdot i \quad (2.47)$$

Os pontos descritos por (2.46) e (2.47) representam dois pontos sobre a reta de mesma condutância. Na disponibilidade de vários oscilogramas, é possível obter um conjunto de pontos para $P(g)$ em função da condutância, que supostamente são iguais para diferentes ensaios, sobre o eixo das abscissas. Da mesma forma é possível encontrar um conjunto de pontos para $1/\tau(g)$, sobre o eixo das ordenadas. Este processo deve ser repetido n vezes, onde n corresponde ao número ensaios, de forma a obter as curvas de $P(g_P)$ e $\tau(g_P)$ e, conseqüentemente, os parâmetros do modelo de arco via regressão numérica.

Figura 2.17 – Representação gráfica do método de Ruppe



Fonte: Adaptado de Rodríguez-Medina et al. (2003)

2.6.5 Método de Zückler

Este método tem como premissa o fato de que para dois instantes de tempo suficientemente próximos as condições do arco elétrico não variam, logo os valores dos parâmetros permaneceriam inalterados para dois tempos próximos. Por exemplo, se os valores de tensão e corrente são conhecidos para dois instantes de tempo t_1 e t_2 , então é possível obter os valores das constantes P_0 e τ_m do modelo de Mayr da seguinte maneira (GIMENEZ, 2003):

Para o tempo t_1 :

$$\left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_1} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i_1^2}{P_0} - g_1 \right) = g'_1 \quad (2.48)$$

Para o tempo t_2 :

$$\left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_2} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i_2^2}{P_0} - g_2 \right) = g'_2 \quad (2.49)$$

De posse dos valores da corrente e da tensão medidas para os tempos t_1 e t_2 , é possível calcular as condutâncias g_1 e g_2 . Resolvendo o sistema de equações de duas

incógnitas acima, podemos obter as expressões para P_0 e τ_m :

$$P_0 = \frac{i_2^2 g_1' - i_1^2 g_2'}{g_1' g_2' - g_2' g_1'} \quad (2.50)$$

$$\tau_m = \frac{i_1^2 g_2' - i_2^2 g_1'}{i_2^2 g_1' - i_1^2 g_2'} \quad (2.51)$$

2.6.6 Método de Glinkowski-Takanashi

O método proposto por Glinkowski e Takanashi (1996) utiliza apenas um ensaio para determinação dos parâmetros do arco elétrico, sendo considerado como um método generalizado quando comparado aos anteriores, uma vez que também não estabelece a necessidade de um ensaio com ou sem reignição. Tomando como exemplo o modelo de Schwarz para a otimização dos parâmetros do arco, a equação (2.33) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\hat{g}'(t) = \frac{d\hat{g}}{dt} = \frac{1}{\tau_0 P_0} \left(u \cdot i \cdot g^{1-\alpha-\beta} - \frac{1}{\tau_0} g^{1-\beta} \right) \quad (2.52)$$

$$\hat{g}'(t) = \frac{d\hat{g}}{dt} = A' \cdot g^{a'} - B' \cdot g^{b'} \quad (2.53)$$

onde $\hat{g}'(t)$ é o valor estimado pelo modelo de Schwarz. O rearranjo feito na equação (2.53) permite separar o problema de otimização em duas partes, linear e não linear, sendo A' e B' os parâmetros lineares, enquanto a' e b' são os parâmetros não lineares. A separação do problema de otimização em duas partes permite uma maior robustez em relação aos parâmetros iniciais escolhidos, aumentando a chance de convergir para um mínimo global (COLEMAN; ZHANG, 2020).

O primeiro passo a ser feito é calcular a condutância utilizando os valores medidos ($g = i/v$), para em seguida calcular o valor da sua derivada ponto a ponto:

$$g'(t) = \frac{g(t) - g(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.54)$$

Por fim, é utilizado um método de otimização sem imposição de limites aos parâmetros para minimizar o erro entre os valores medidos $g'(t)$ e os valores calculados pelo modelo $\hat{g}'(t)$.

$$\text{erro} = \max[g' - \hat{g}'] \quad (2.55)$$

2.6.7 Método de Asturiano

Semelhante ao método anterior, este método foi proposto por Giménez e Hevia (1999) e também necessita de apenas um ensaio para determinar os parâmetros do modelo de arco escolhido, independente de existir ou não reigñão. Existem três principais diferenças entre o método de Glinkowski-Takanashi e o método Asturiano, sendo a primeira delas na forma como a derivada é calculada:

$$g(t) = \frac{i(t)}{u(t)} \quad (2.56)$$

$$g'(t) = \frac{g(t - \Delta t) - g(t + \Delta t)}{2\Delta t} \quad (2.57)$$

A segunda diferença encontra-se na forma de escrever a equação do modelo do arco:

$$\hat{g}'(t) = \frac{g(t)}{\tau(g)} \left(\frac{u(t) \cdot i(t)}{P(g)} - 1 \right) \quad (2.58)$$

Por fim, a última diferença está no método de otimização dos parâmetros, que neste caso, utiliza o método dos mínimos quadrados para encontrar os melhores parâmetros que minimizam o erro entre os valores calculados e os valores medidos.

$$\sum_{i=1}^n [g'(t) - \hat{g}'(t)]^2 \quad (2.59)$$

2.6.8 Método utilizando identificação de sistemas

A identificação de sistemas consiste em uma metodologia para construir um modelo matemático que represente um sistema dinâmico utilizando as medidas dos sinais de entrada e saída do sistema. A aplicação desta teoria na modelagem do arco elétrico foi proposta por Rodríguez-Medina (2003).

Dado um conjunto N de medidas de dados de entrada e saída, que pode ser escrito da seguinte forma:

$$Z^N = [y^N, u^N], \quad (2.60)$$

$$y^N = [y(1), y(2), \dots, y(N)]^T \quad (2.61)$$

$$u^N = [u(1), u(2), \dots, u(N)]^T \quad (2.62)$$

onde $y(t)$ e $u(t)$ representam os sinais de entrada e de saída do sistema, respectivamente. Estes dados são ajustados ao modelo do arco elétrico, que podem ser considerados como um modelo do tipo caixa-branca, caixa-cinza ou caixa-preta. Os modelos de arco elétrico descritos na literatura são comumente classificados como modelos do tipo caixa-preta, entretanto, por se tratarem de modelos com estruturas definidas, mas com parâmetros desconhecidos, eles também podem ser classificados como modelos do tipo caixa-cinza, como adotado por Câmara (2010). O modelo a ser ajustado possui a seguinte característica:

$$\hat{y}(t, \theta) = g(t, \theta) \quad (2.63)$$

onde $\hat{y}(t, \theta)$ representa a estimativa do modelo para $y(t)$, utilizando o vetor de parâmetros θ a ser estimado. A definição dos parâmetros de θ normalmente é feita por meio da solução de um problema de otimização, com objetivo de minimizar uma função custo que representa o erro entre a saída do modelo e a saída medida.

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} V_N(\theta, Z^N) \quad (2.64)$$

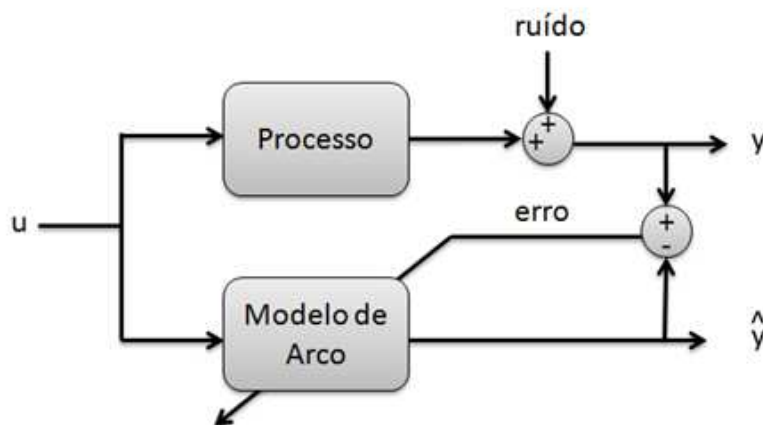
onde:

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ell(\epsilon(t, \theta)) \quad (2.65)$$

$$\epsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t, \theta) \quad (2.66)$$

A equação (2.65) representa a função custo a ser minimizada, onde $\epsilon(t, \theta)$ é o erro e o operador $\ell(\cdot)$ representa a norma do erro, podendo ser utilizada neste caso a norma simples ou a norma quadrada. A Figura 2.18 mostra um exemplo da metodologia de identificação de sistemas para um sistema de uma entrada e uma saída.

Figura 2.18 – Metodologia de identificação de sistemas



Fonte: Adaptado de Rodríguez-Medina et al. (2003)

No trabalho desenvolvido por Medina, foi utilizada a norma quadrada da função custo, resultando em um problema de otimização usando mínimos quadrados. Além disto, como os modelos de arco elétrico são modelos não lineares, trata-se de um problema de otimização não linear usando mínimos quadrados.

Um dos métodos padrões utilizados para calcular os parâmetros deste tipo de problema é o método iterativo de Gauss-Newton (RODRÍGUEZ-MEDINA; ORAMA-EXCLUSA; VÉLEZ-REYES, 2003), no entanto outros métodos podem ser aplicados, tais como o método do Gradiente Descendente ou método de Levenberq-Marquardt (LJUNG, 2020).

Uma outra utilização da teoria de identificação de sistemas aplicada a modelagem do arco foi proposta por Asencios (2009), onde é feita a linearização do sistema em torno de um ponto de operação, para posterior otimização dos parâmetros do modelo baseado no Filtro de Kalman e no método de Máxima Verossimilhança.

2.6.9 Método utilizando algoritmos genéticos

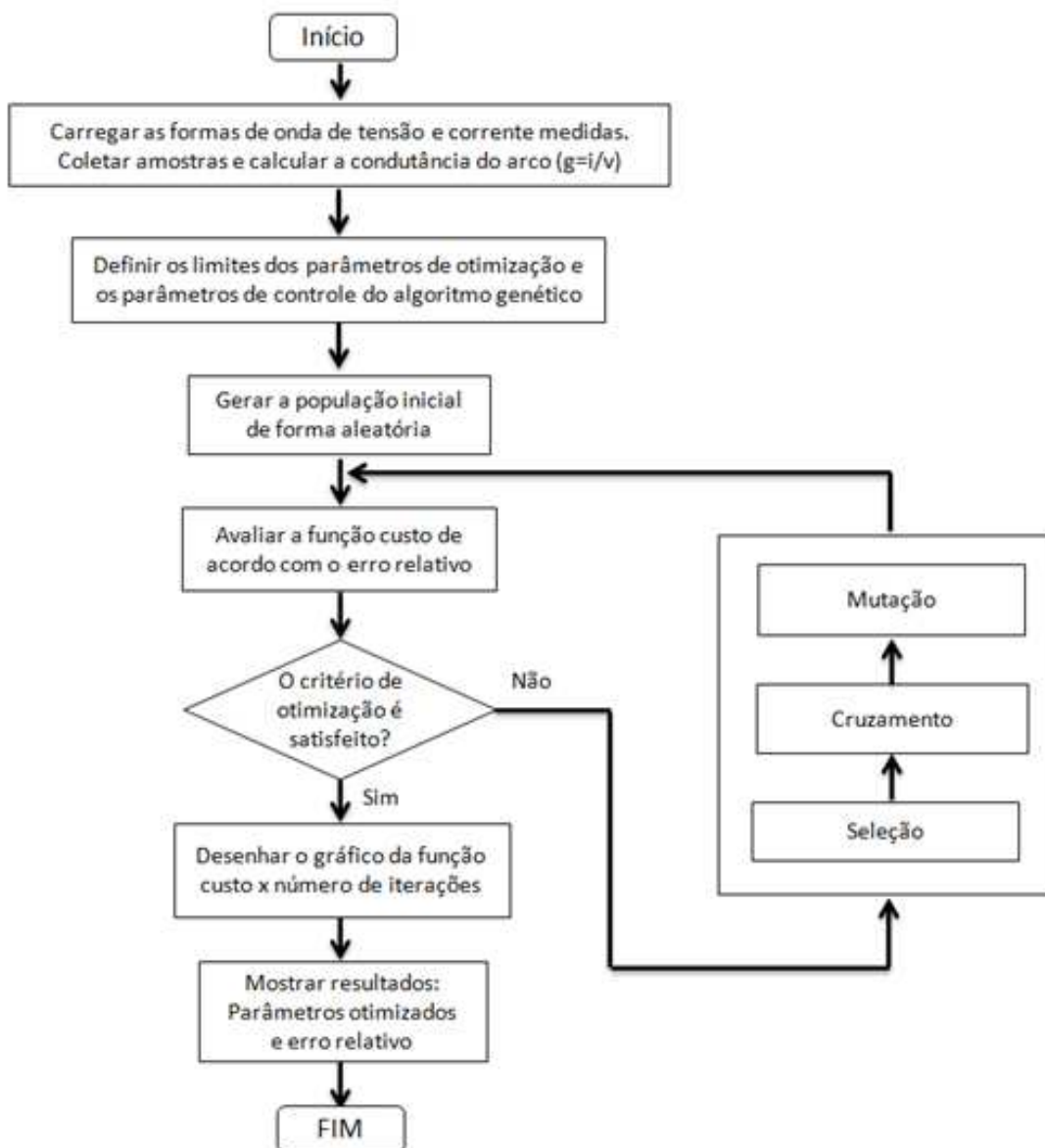
A utilização de métodos heurísticos de otimização como algoritmos genéticos (AG) para determinar os parâmetros do arco elétrico foi proposta por diferentes autores, tais como Rashtchi (2008), Parizad (2009), e Zhang (2018). Assim como nos métodos anteriores, os algoritmos genéticos são usados com objetivo de minimizar o erro relativo acumulado entre a condutância medida e estimada pelo modelo.

$$\min f(\tau, \dots) = \sum_{t=t_1}^{t_2} \frac{|g_{opti}(t) - g(t)|}{g(t)} x 100 \quad (2.67)$$

Na equação (2.67), $g(t)$ representa a condutância do circuito obtida através das formas de onda de tensão e corrente medidas, e $g_{opti}(t)$ é a condutância calculada, obtida dos resultados de simulações. O parâmetro t_1 é definido como o tempo no qual após $20 \mu s$ o arco elétrico se inicia, de forma evitar erros de cálculo devido à inicialização de um valor constante para a condutância, e t_2 é definido como o tempo no qual a corrente cruza por zero (ZHANG et al., 2018).

O fluxograma representativo de um algoritmo genético é mostrado na Figura 2.19. Primeiramente carregam-se os dados das formas de onda de tensão e corrente do arco para então calcular a condutância ponto a ponto ($g = i/v$). Em seguida são definidos os limites dos parâmetros de otimização e os parâmetros de controle do algoritmo, para depois fazer a inicialização da população. A função custo é avaliada, e caso o critério de otimização seja satisfeito, os resultados são exibidos, caso contrário, deve-se realizar os passos de seleção, cruzamento e mutação na população até que o critério de otimização seja satisfeito.

Figura 2.19 – Fluxograma representativo do algoritmo genético



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2018)

2.7 Considerações Adicionais

De todo o estudo de modelagem matemática do arco elétrico, a determinação dos parâmetros ou funções características $P(g)$ e $\tau(g)$ é uma das áreas mais controversas, dadas as dificuldades encontradas em termos de dispersão dos valores obtidos. Esta dispersão é causada, por um lado, pelo comportamento estatístico do arco, e por outro, pela imprecisão nas medições feitas a partir dos oscilogramas $u(t)$ e $i(t)$ dos ensaios reais (CARVALHO et al., 1995).

Dentre os diversos métodos de cálculo de parâmetros apresentados nesta seção, podemos fazer uma separação entre os métodos que necessitam de apenas um ensaio de abertura do disjuntor, como é o caso dos métodos de Asturiano e Glinkowski-Takanashi, e aqueles que necessitam de dois ou mais, como os métodos de Ruppe e o método generalizado. Além disso, existem ainda aqueles que necessitam de características específicas do ensaio, como a existência de reignição no caso do método de Amsink, ou a necessidade de um circuito sintético de injeção de corrente como o método de Rijanto. A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos métodos avaliados e suas principais características.

Tabela 2.2 – Características dos métodos de determinação de parâmetros

Método	Número de Ensaio	Condições Especiais
Amsink	1	Necessidade de reignição
Rijanto	1	Circuito sintético de injeção de corrente
Generalizado	2	Não
Ruppe	Mais de 2	Dados apenas de reignições ou apenas de circuitos sintéticos
Zückler	1	Assume $P(g)$ e $\tau(g)$ constantes para dois tempos próximos
Glinkowski-Takanashi	1	Não
Asturiano	1	Não
Identificação de Sistemas	1	Não
Algoritmos Genéticos	1	Não

De todos os métodos apresentados, aqueles que possuem um melhor desempenho na determinação dos parâmetros do arco elétrico são os métodos baseados na solução de problemas de otimização, como os métodos de Glinkowski-Takanashi, método de Asturiano, métodos baseados na teoria de identificação de sistemas e métodos heurísticos baseados em algoritmos genéticos. Estes métodos são muitas vezes considerados como métodos generalizados em relação aos outros, uma vez que não necessitam de múltiplos ensaios nem de condições especiais ou suposições matemáticas.

Adicionalmente, dentre os métodos que necessitam de condições especiais, nem sempre é possível aplicá-los em sistemas de corrente contínua, como é o caso daqueles que precisam de reigitação, ou quando não se dispõe de múltiplos ensaios. Além disso, a replicação destes métodos para diferentes modelos de arco elétrico é mais laboriosa quando comparado aos demais.

Dentre os métodos generalizados, vale ainda destacar uma diferença em relação à função custo implementada. Os métodos de Asturiano e de Glinkowski-Takanashi utilizam a derivada da condutância na função custo, enquanto os métodos de identificação de sistemas e algoritmos genéticos aqui apresentados utilizam a condutância diretamente. Como os modelos de arco elétrico estão normalmente expressos na forma de equações diferenciais, é necessário utilizar algum método de integração para estimar o valor da condutância, que pode ser feito utilizando-se o método de Euler, Runge-Kutta, integração trapezoidal ou outro método. Por outro lado, aqueles que utilizam o valor da derivada calculada ponto a ponto apresentam sinais ruidosos, sendo normalmente necessário fazer um tratamento destes sinais para evitar uma degradação no desempenho dos algoritmos de determinação de parâmetros.

Neste trabalho o cálculo dos parâmetros dos modelos de arco elétrico foi realizado por meio de Algoritmos Genéticos, pois além dos motivos apresentados anteriormente, este método também apresenta uma ampla variedade de controles disponíveis para refinar o processo de otimização, tais como tamanho da população, diferentes tipos de cruzamento, seleção, mutação, dentre outros. Adicionalmente, os algoritmos genéticos tendem a ser menos susceptíveis a escolha do ponto inicial, possuindo uma melhor capacidade de busca por mínimos globais.

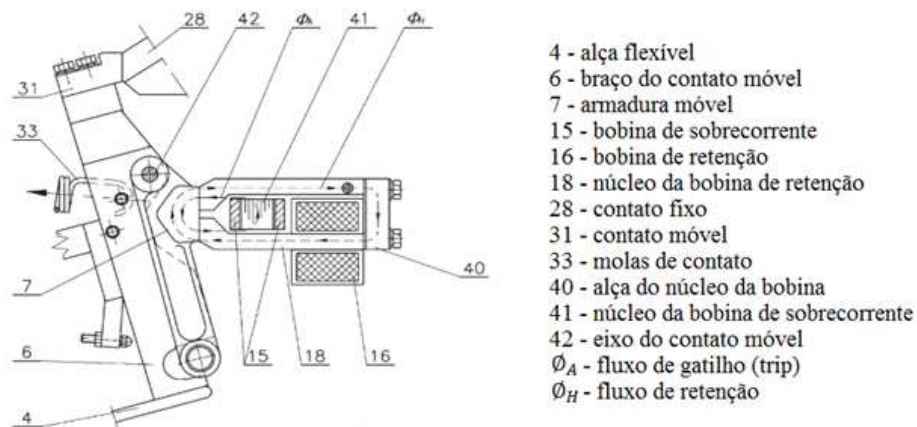
3 DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o experimento de referência e todo o processo de modelagem do arco elétrico, desde o tratamento dos dados de entrada, referente às curvas de oscilografia de tensão e corrente, seguindo pelo desenvolvimento matemático dos modelos escolhidos, e terminando com o processo de ajuste dos parâmetros dos modelos de arco e simulação do circuito elétrico.

3.1 Experimento de Referência

O experimento de referência escolhido para ser modelado e simulado foi apresentado no trabalho desenvolvido por Rojek (2015). O artigo técnico apresenta as curvas de oscilografia referentes aos testes de curto-circuito realizados em disjuntores utilizados em sistemas de tração ferroviária na Polônia. Os testes foram realizados em um disjuntor do tipo BWS da General Electric (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Esquema do sistema de liberação e retenção do disjuntor BWS



Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

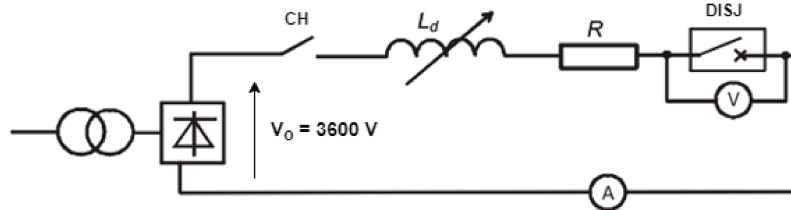
A operação do disjuntor BWS é baseada no princípio da retentividade magnética, ou seja, a abertura automática ocorre quando o fluxo magnético (ϕ_A) gerado pela corrente que flui através da bobina da sobrecorrente (15) enfraquece suficientemente o fluxo magnético da bobina de retenção (ϕ_H).

Quando fechado, a armadura móvel (7) adere firmemente ao núcleo da bobina de retenção (18). A bobina de retenção (16) gera um fluxo magnético ϕ_H que flui através do núcleo (18, 40) e da armadura (7), sendo que a corrente principal flui através da bobina de liberação de sobrecorrente (15), que gera um fluxo ϕ_A passando pela armadura (7),

no entanto sua direção é oposta à do fluxo de retenção ϕ_H . A diferença entre os fluxos determina a força de retenção da armadura (7), que é puxada por uma mola (33). Se a força de retenção cair abaixo da força da mola (33), a armadura (7) é retirada do núcleo (18) e os contatos são abertos (GE, 2000).

Os testes foram realizados em um sistema alimentado por um retificador de 6 pulsos. Os valores das resistências e indutâncias do circuito foram ajustados de forma a obter um valor semelhante de constante de tempo em cada teste. Isto significa que um aumento da corrente de curto-circuito sustentada (I_{ss}) também acarreta em um aumento da inclinação da corrente (di/dt). O disjuntor foi configurado com um valor de sobrecorrente $I_d = 1500$ A, e a tensão nominal média aplicada ao disjuntor foi de 3,6 kV.

Figura 3.2 – Esquema do circuito de teste

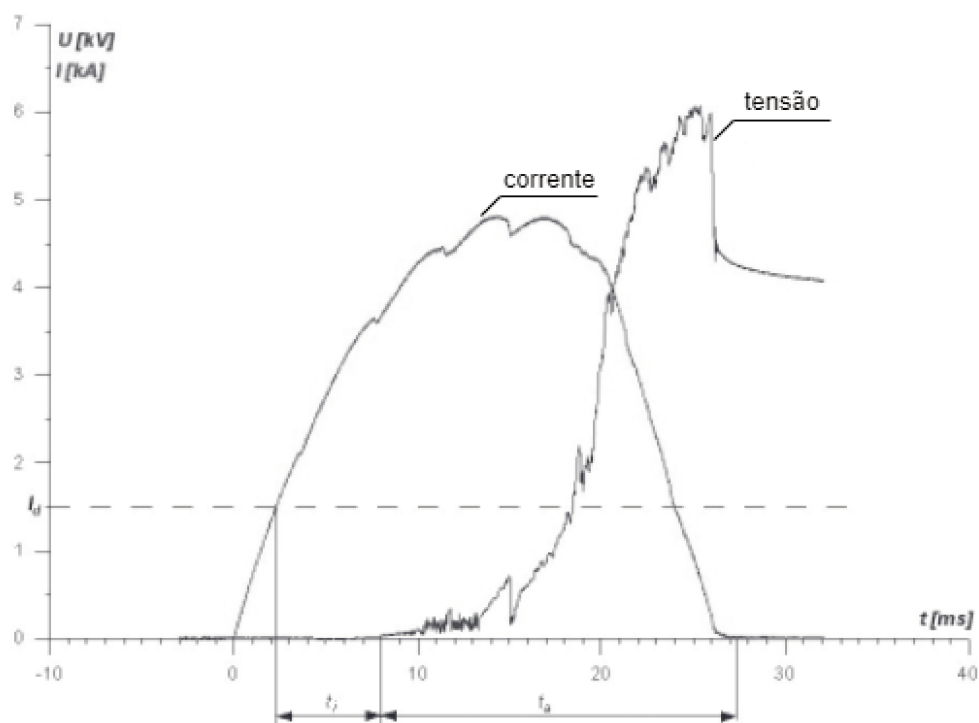


Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

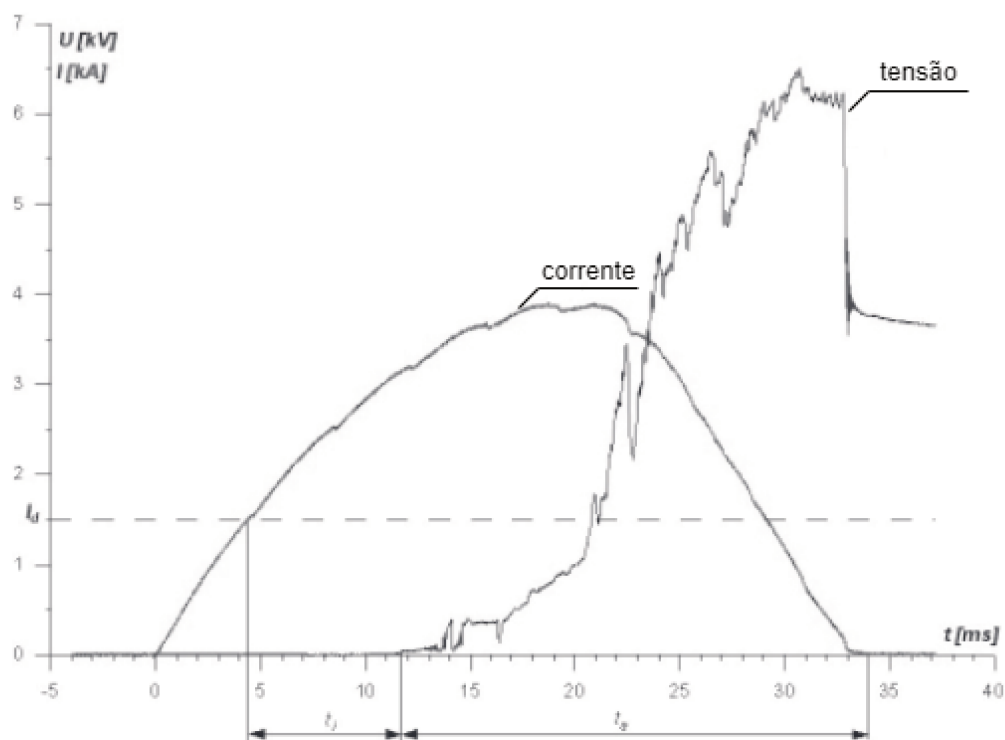
Foram realizados conjuntos de testes com diferentes ajustes de resistência e indutância, de forma que as constantes de tempo dos circuitos ficassem em torno de 9,2 ms ou 16,4 ms, com de correntes de curto sustentadas próximas de 1500 ou 5400 A, respectivamente. Os dados referentes aos testes estão resumidos na Tabela 3.1, e as formas de onda dos ensaios realizados são apresentadas nas Figuras 3.3 a 3.6.

Tabela 3.1 – Características dos ensaios de curto-circuito

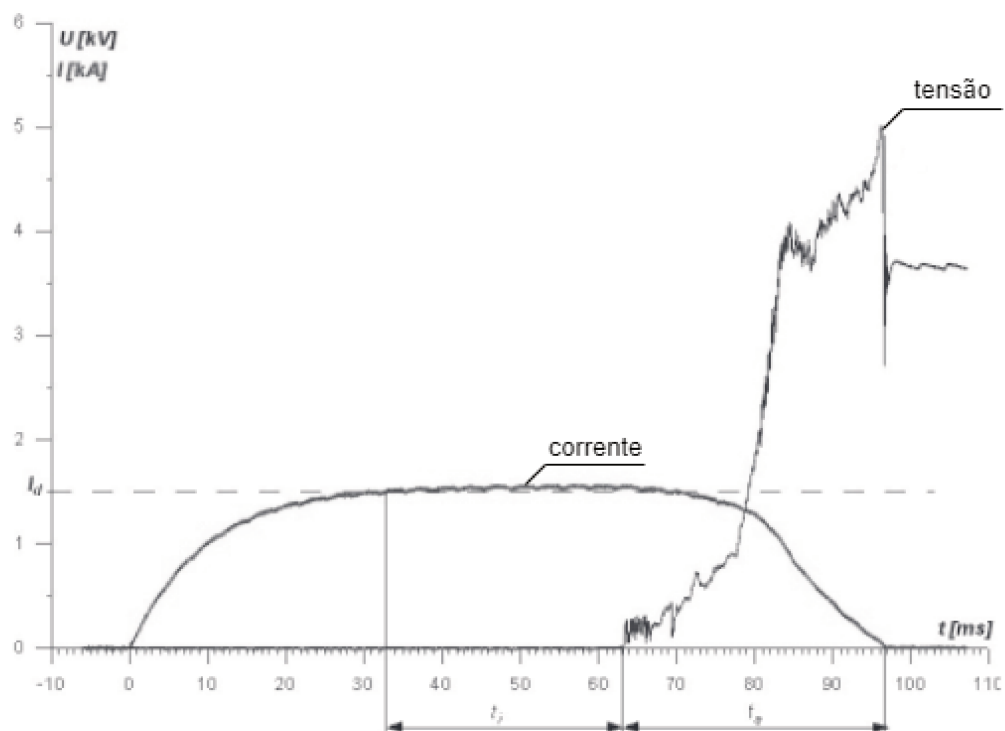
Teste	τ [ms]	I_{SS} [A]	$I_{cut\ off}$ [A]
1	9,2	5453	4825
2	16,4	5278	3879
3	9,2	1553	1550
4	16,4	1520	1508

Figura 3.3 – Formas de onda para $I_{SS} = 5453$ A e $t_c \approx 9,2$ ms

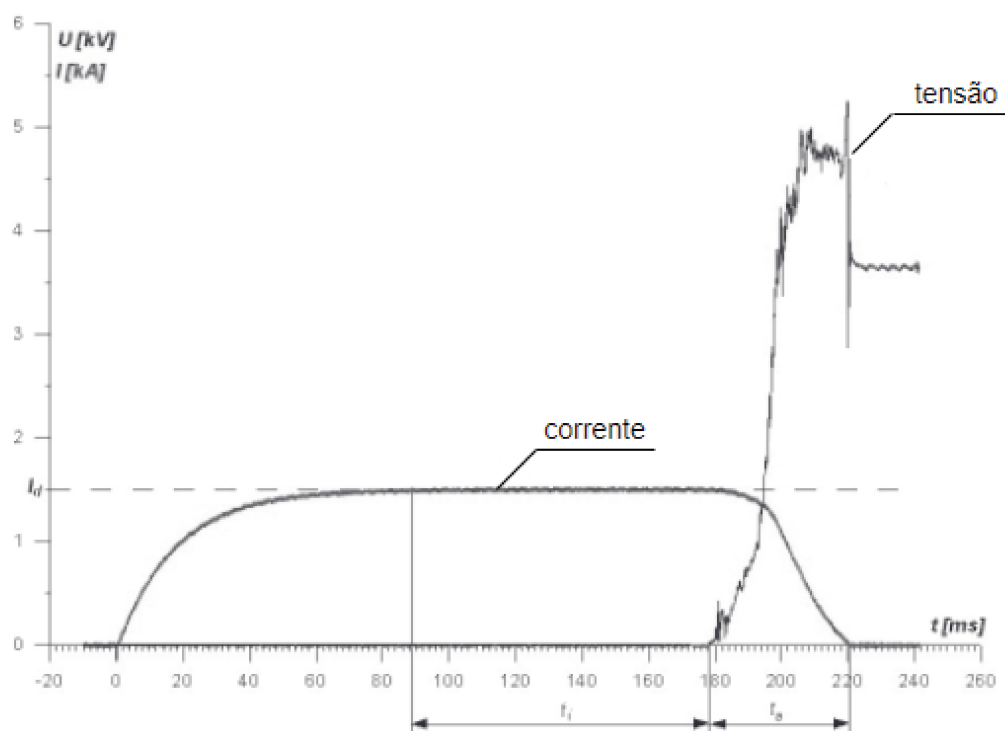
Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

Figura 3.4 – Formas de onda para $I_{SS} = 5278$ A e $t_c \approx 16,4$ ms

Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

Figura 3.5 – Formas de onda para $I_{SS} = 1553$ A e $t_c \approx 9,2$ ms

Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

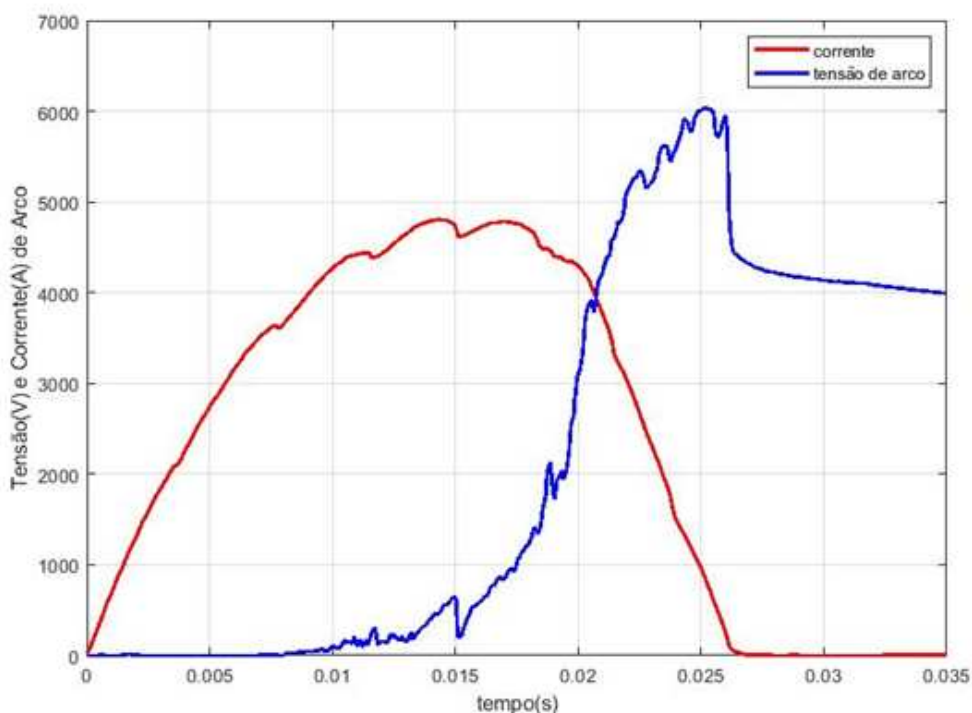
Figura 3.6 – Formas de onda para $I_{SS} = 1520$ A e $t_c \approx 16,4$ ms

Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

3.2 Tratamento de Dados

O tratamento dos dados de entrada é semelhante para a maioria dos métodos de determinação dos parâmetros do arco elétrico. O primeiro passo consiste em fazer a leitura das curvas de oscilografia para o *software* que irá executar o programa. Esta etapa foi realizada por meio da função *Grabit.m* do Matlab (DOKE, 2020), sendo que a leitura das formas de onda do Teste 1 (Figura 3.3) é apresentada na figura 3.7.

Figura 3.7 – Leitura de tensão e corrente de arco no Matlab



Fonte: Autor

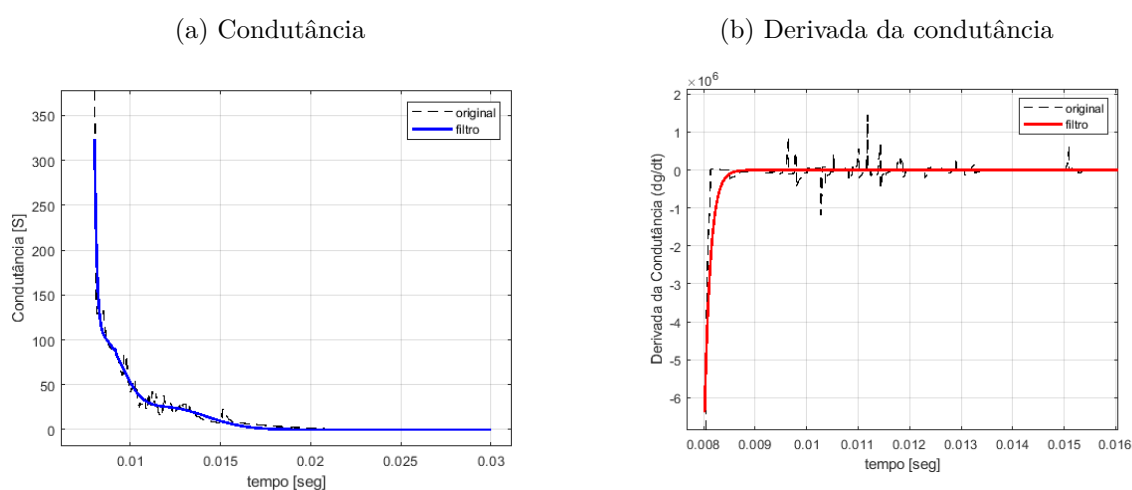
De posse dos dados de corrente e tensão, é possível calcular a condutância do arco e sua derivada ponto a ponto. Como o sinal da derivada da condutância necessita de uma etapa adicional de cálculo sobre os sinais de entrada, ela apresenta um comportamento mais ruidoso do que o sinal da condutância, sendo que os métodos que trabalham com o sinal da derivada tendem a apresentar um desempenho inferior aos métodos que utilizam a condutância na sua função custo. Por esta razão, foi utilizado o sinal da condutância como referência para o problema de otimização.

O bom desempenho dos algoritmos de otimização está vinculado à apresentação de sinais regulares em sua entrada, sendo eventualmente necessário fazer um tratamento prévio do sinal da condutância. Existem diversas possibilidades para realizar este tratamento, dentre as quais podemos citar o filtro de Savitsky-Golay, conhecido por ser um alisador de sinais e também pelo bom desempenho na reprodução de sinais derivados no

tempo, além do ajuste de curvas, sendo a gaussiana a função mais comumente utilizada (GHEZZI; BALESTRERO, 2010).

A Figura 3.8 apresenta os sinais de condutância do arco e sua derivada, calculados a partir das formas de onda de tensão e corrente mostradas na Figura 3.7. As curvas tracejadas na cor preta representam os sinais medidos, enquanto as curvas em azul e vermelho representam os ajustes de uma função gaussiana para os sinais de condutância e para sua derivada, respectivamente. É possível notar que o gráfico da derivada da condutância apresenta um nível de ruído elevado quando comparado ao gráfico da condutância, conforme mencionado anteriormente.

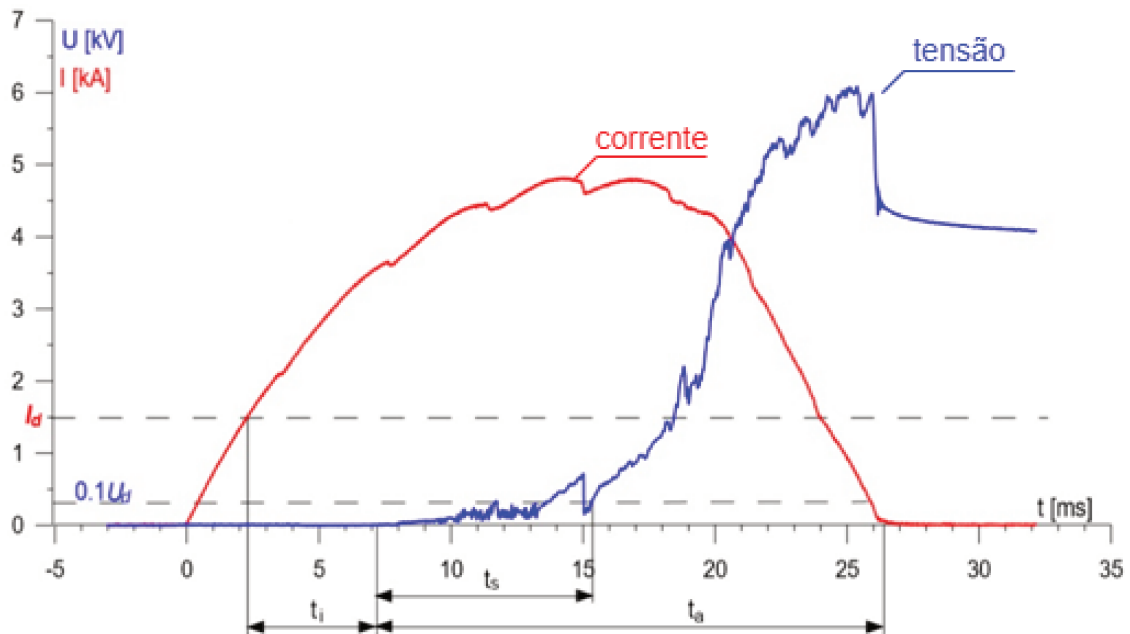
Figura 3.8 – Exemplos de tratamento dos sinais de entrada



Fonte: Autor

O tempo de registro considerado para as curvas acima foi a partir de 8 ms , que seria aproximadamente o tempo em que os contatos do disjuntor começam a se separar. No entanto, conforme demonstrado por Rojek (2019), após o início da separação dos contatos do disjuntor, existe um tempo em que o arco elétrico permanece próximo a região entre o catodo e o anodo, chamado de tempo de contato do arco (t_s), e que praticamente não contribui para a extinção da corrente de curto. O conceito de tempo de contato do arco está ilustrado na Figura 3.9, sendo que o tempo efetivo para eliminação da corrente de falta passa a ser considerado a partir do momento em que a tensão do arco elétrico supera 10% do valor da fonte, e não retorna mais, até a eliminação do curto. O tempo t_i corresponde ao intervalo de tempo entre o momento que o valor da corrente supera o ajuste de trip (1500 A) e o início da abertura dos contatos, enquanto t_a representa o tempo total de arco.

Figura 3.9 – Curvas de tensão e corrente de arco para teste 1



Fonte: Adaptado de Rojek e Skrzyniarz (2019)

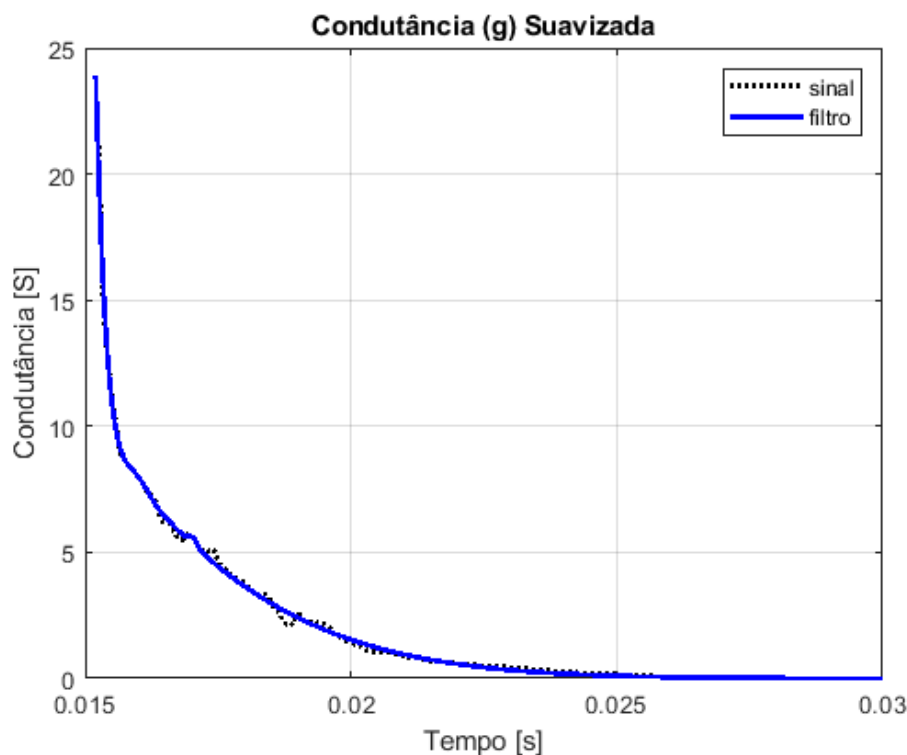
Por consequência, o tempo de *trip* considerado para modelagem do arco elétrico foi de aproximadamente 15 *ms* para o teste 1, que representa o tempo em que o arco elétrico contribui efetivamente para eliminação da corrente de curto-circuito. Além disso, foi adicionada uma margem 20 μs após o tempo de contato do arco, visando evitar erros de cálculo devido à inicialização de um valor constante para a condutância nos algoritmos de obtenção dos parâmetros do arco (ZHANG et al., 2018).

A nova curva de condutância considerada para o teste 1 é mostrada na Figura 3.10 e a Tabela 3.2 apresenta o tempo de *trip* considerado para os demais experimentos.

Tabela 3.2 – Instantes de abertura do disjuntor

Teste	<i>trip</i> [ms]
1	15,2
2	16,4
3	69,54
4	183,5

Figura 3.10 – Sinal da condutância original e com filtro



3.3 Cálculo dos Parâmetros do Arco Elétrico

Grande parte dos algoritmos de otimização possuem a desvantagem de serem sensíveis ao ponto de partida escolhido, ou seja, dependendo do valor inicial definido, o algoritmo pode convergir para um mínimo local, o que nem sempre é uma solução adequada. A busca por um mínimo global é um problema muito complexo, e na prática, existem algumas alternativas para contornar esta dificuldade. Uma possibilidade é a combinação de dois métodos de busca, onde um deles é utilizado para delimitar uma região de confiança, e outro para refinar a busca, como proposto em (BALESTRERO et al., 2010). Outra alternativa é realização de uma busca por varredura, onde são feitas uma série de simulações utilizando um conjunto de valores pré-definidos, permitindo assim obter uma estimativa de forma visual da região de confiança da solução, como proposto em (LIM et al., 2015), (PARK et al., 2017) e (PARK et al., 2019).

Este problema é comum aos métodos determinísticos de otimização, sendo que os métodos heurísticos de busca, como os algoritmos genéticos, se apresentam como uma boa alternativa para contornar este tipo de situação. Em alguns casos apenas o conhecimento da ordem de grandeza dos parâmetros já é suficiente para estimação dos mesmos.

Embora os algoritmos genéticos normalmente apresentem um número maior de iterações em relação aos métodos determinísticos, principalmente devido à quantidade de avaliações realizadas sobre a função custo, eles possuem uma melhor capacidade de busca por soluções globais, além de serem menos sensíveis à escolha do ponto inicial. Por estes motivos, o processo de otimização para os demais experimentos e modelos de arco elétrico será feito utilizando a abordagem descrita a seguir.

3.3.1 Algoritmos genéticos

O cálculo dos parâmetros dos modelos de arco elétrico foi realizado utilizando algoritmos genéticos. A metodologia é similar à apresentada no capítulo 2.6.9 proposta por Zhang (2018), com pequenas modificações, a começar pela definição da função de custo mostrada a seguir:

$$\min f(\tau, \dots) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} \sqrt{(g_{opti}(t) - g(t))^2}}{N} \quad (3.1)$$

onde g é a condutância do arco calculada a partir das curvas de teste, g_{opti} é a condutância do modelo de arco, t_1 é o tempo inicial considerado para eliminação da falta (Tabela 3.2), t_2 é o instante de extinção da corrente de curto, e N representa o tamanho da amostra.

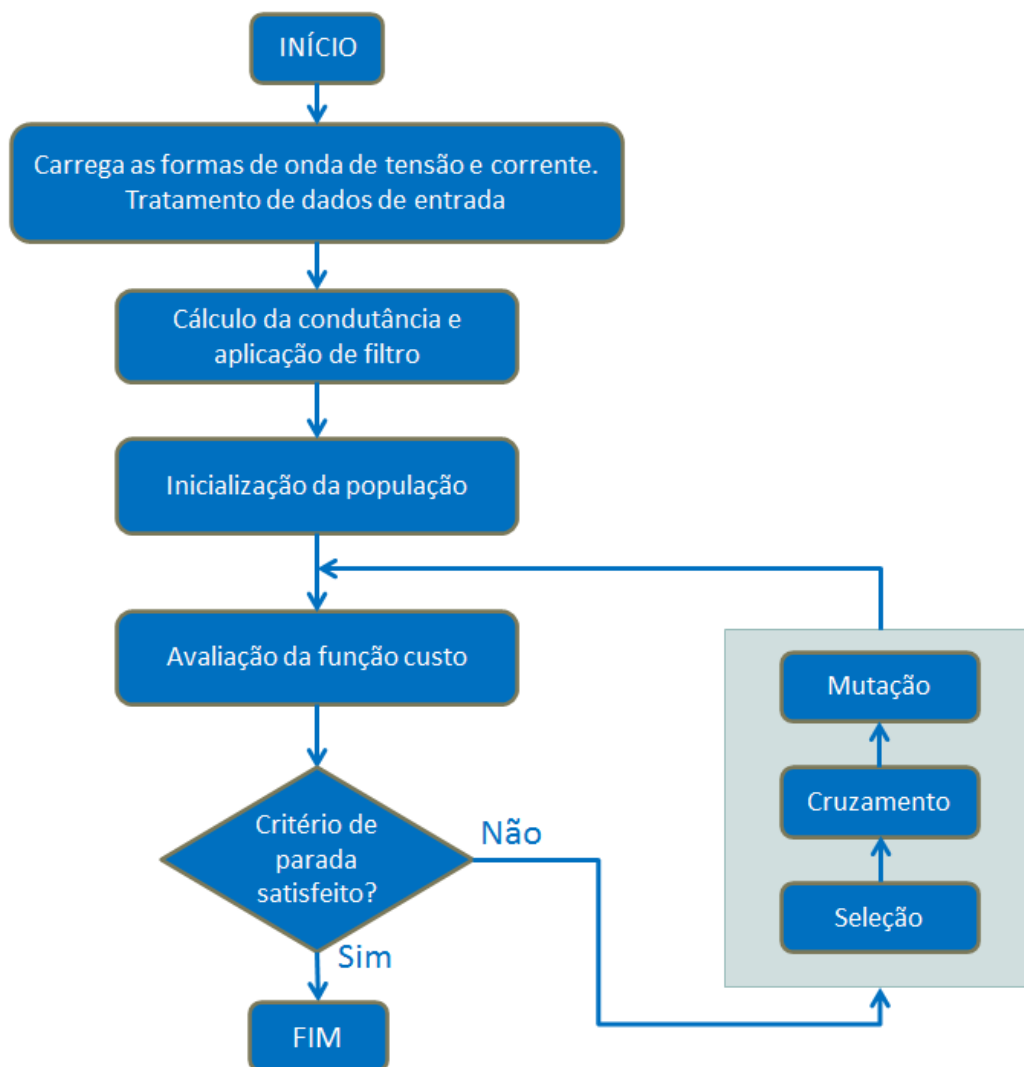
O fluxograma do algoritmo genético é mostrado na Figura 3.11. Primeiramente, as formas de onda da tensão do arco e da corrente de curto são carregadas no programa. Em seguida, a condutância do arco é calculada para cada registro de tempo usando a lei de Ohm ($g = i/v$). A população é inicializada de acordo com o grau de magnitude de cada parâmetro e a função custo é avaliada para cada solução. Se o critério de parada for satisfeito, o processo de otimização termina, caso contrário, os operadores de seleção natural, cruzamento e mutação são executados. Este processo é repetido até que o critério de parada seja satisfeito.

O processo de otimização foi realizado para uma população de 50 indivíduos, utilizando seleção por torneio, cruzamento aritmético e uma probabilidade de mutação de 25%. O critério de parada escolhido foi o número total de gerações, com valor igual a 100, sendo que os parâmetros do algoritmo foram ajustados manualmente de forma que todos os experimentos convergissem. O programa foi desenvolvido em linguagem *python* e o código para o modelo de Mayr encontra-se no Apêndice A.

O tempo médio de execução do algoritmo depende do tamanho da amostra do teste e também do equacionamento do modelo de arco, devido à sua função de integração. A Tabela 3.3 mostra o tempo médio de execução do algoritmo para os modelos apresentados, considerando o número de gerações igual a 100. Este tempo contempla uma única execução,

sendo que os parâmetros de cada um dos modelos foram calculados de 20 a 50 vezes, dependendo do modelo, e a solução de menor custo foi selecionada.

Figura 3.11 – Fluxograma do algoritmo genético



Fonte: Autor

Tabela 3.3 – Tempos médios de execução do algoritmo genético para 100 gerações

Modelo	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Cassie	12 s	15 s	29 s	42 s
Mayr	16 s	24 s	51 s	78 s
Schwarz	60 s	84 s	164 s	211 s
Habedank	14 s	20 s	40 s	55 s

3.3.2 Método de integração

Como os modelos de arco elétrico são expressos em função da derivada da condutância, o valor de g_{opti} utilizado na função custo deve ser obtido por meio de um método de integração numérica.

Diferentes métodos de integração foram testados neste trabalho, tais como os métodos de Euler e Trapezoidal. No entanto, o método escolhido foi a aproximação de quarta ordem de Runge-Kutta, uma vez que sua formulação compacta apresenta um bom compromisso entre implementação e tempo de execução, além da facilidade de generalização para diferentes modelos de arco elétrico, incluindo os mais complexos (RODRÍGUEZ-MEDINA, 2003). Dada uma equação na seguinte forma:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y(t)) \quad (3.2)$$

O valor da função aproximado pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem é calculado da seguinte maneira:

$$k_1 = hf(t, y(t)) \quad (3.3)$$

$$k_2 = hf\left(t + \frac{h}{2}, y(t) + \frac{k_1}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$k_3 = hf\left(t + \frac{h}{2}, y(t) + \frac{k_2}{2}\right) \quad (3.5)$$

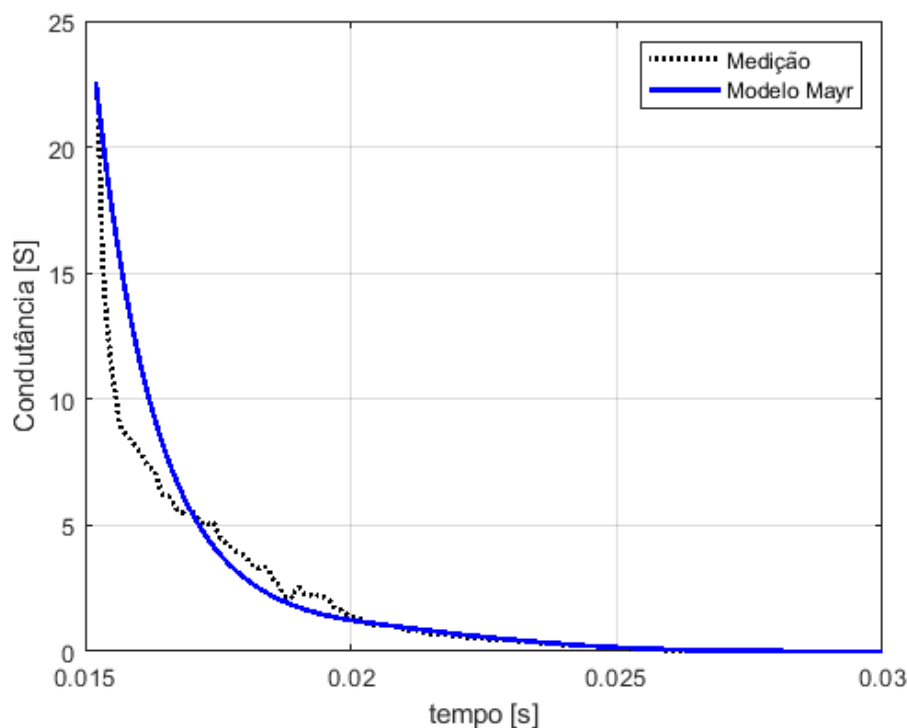
$$k_4 = hf(t + h, y(t) + k_3) \quad (3.6)$$

$$y(t + h) = y(t) + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.7)$$

onde h representa o passo de integração. O valor de h deve ser escolhido de acordo com a precisão desejada, sendo que quanto menor for o passo de integração, melhor será a precisão dos resultados. Neste trabalho foi utilizada uma taxa de amostragem de $0,5 \mu s$.

Os parâmetros estimados para o modelo de Mayr são apresentados na Tabela 3.4, enquanto a curva de condutância do modelo é mostrada na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Curva de condutância ajustada pelo modelo de Mayr



Fonte: Autor

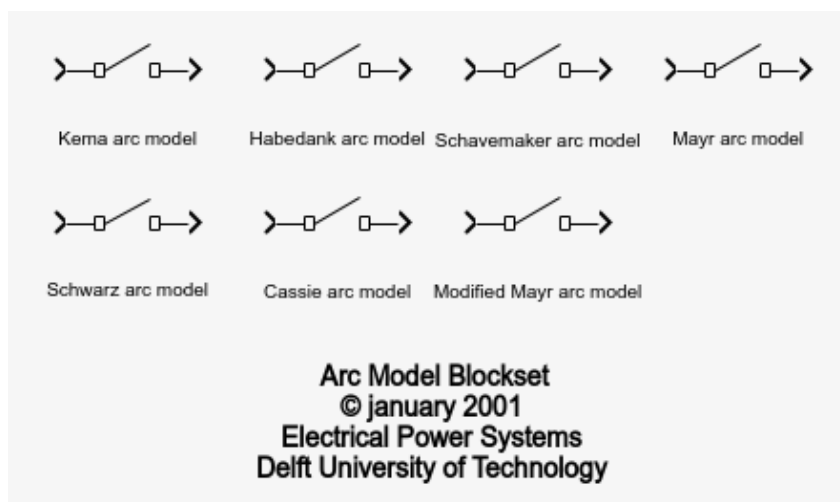
Tabela 3.4 – Resultados da otimização para o modelo de Mayr

Método de Otimização	τ_m [ms]	P_0 [MW]	Erro _(custo)
Algoritmos Genéticos	1,1475	21,8314	0,5650

3.4 Circuito Simulado

Após o cálculo dos parâmetros do arco elétrico, é feita uma simulação do circuito de referência para obtenção das formas de onda de tensão e corrente. Esta etapa foi feita no software Simulink do Matlab, tendo em vista que já existe uma biblioteca disponível de disjuntores com modelos de arco elétrico embutidos. A biblioteca utilizada é a "Arc Model Blockset", que foi desenvolvida pela *Delft University of Technology* - Holanda, e apresentada por Schavemaker e Sluis (2002). A Figura 3.13 mostra uma imagem da biblioteca e os modelos disponíveis.

Figura 3.13 – Biblioteca de disjuntores

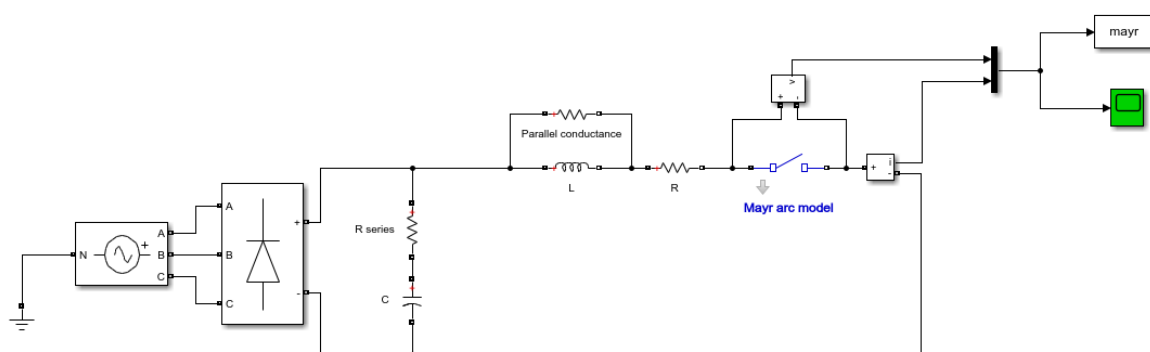


Fonte: Autor

De maneira geral, o circuito simulado deveria ser o mais próximo possível do circuito do experimento de referência (Figura 3.2), que consiste de um transformador, um retificador de seis pulsos e também dos elementos variáveis (resistência e indutância). No entanto, não existem informações suficientes acerca dos componentes utilizados no teste, especialmente com relação aos dados da fonte e do transformador, acrescentando assim muitas incertezas ao circuito simulado. Por este motivo, optou-se por simular um circuito simplificado, composto por uma fonte ideal, um retificador de seis pulsos, um disjuntor e os componentes resistivo e indutivo. Além destes componentes mencionados, foram adicionados um filtro RC na saída do retificador, visando reduzir a ondulação da tensão do arco elétrico após a eliminação da corrente de curto, e também uma condutância em paralelo com o indutor para evitar oscilações numéricas.

O circuito simplificado para o disjuntor com o modelo de Mayr é mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Circuito simplificado para simulação



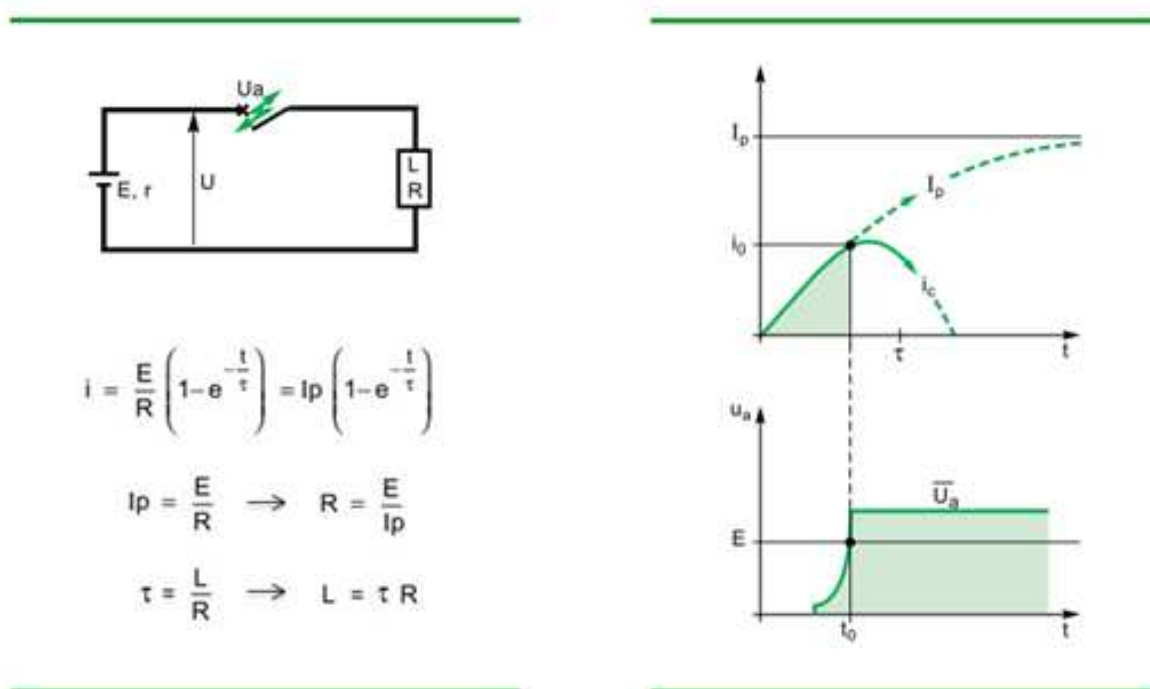
Fonte: Autor

3.4.1 Parâmetros do circuito

Os parâmetros de resistência e indutância do circuito simulado são estimados a partir do gráfico da corrente de curto-circuito. Se tomarmos a curva da corrente desde o instante inicial do curto até o momento em que o arco elétrico se inicia, é possível ajustar uma equação na forma de uma exponencial (equação (2.4)), conforme mostrado no capítulo 2.1, estimando os valores da corrente de pico e da constante de tempo. De posse destes valores, a resistência e a indutância podem ser calculadas por meio das equações (2.5) e (2.6).

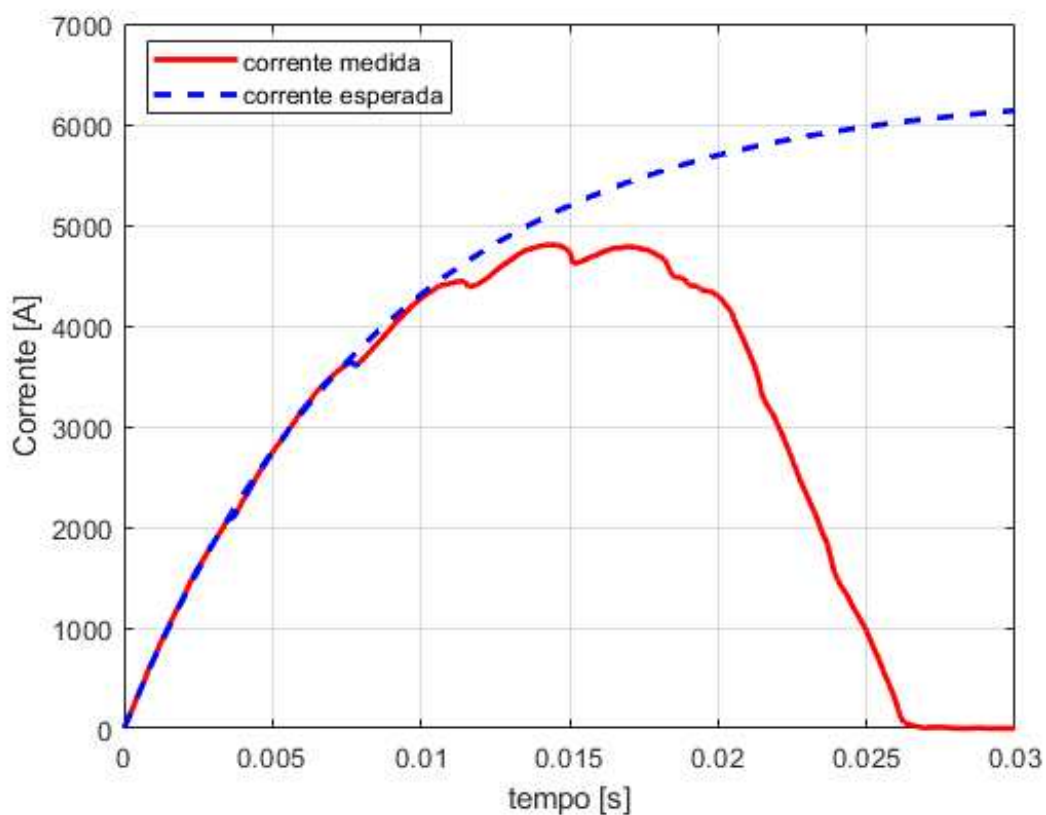
Um esquema gráfico com as equações utilizadas e uma aproximação feita para a curva de corrente da Figura 3.7 são mostrados nas Figura 3.15 e Figura 3.16, respectivamente.

Figura 3.15 – Esquemático para cálculo dos parâmetros do circuito



Fonte: Adaptado de Morel (2000)

Figura 3.16 – Corrente de curto-circuito esperada para teste 1



Fonte: Autor

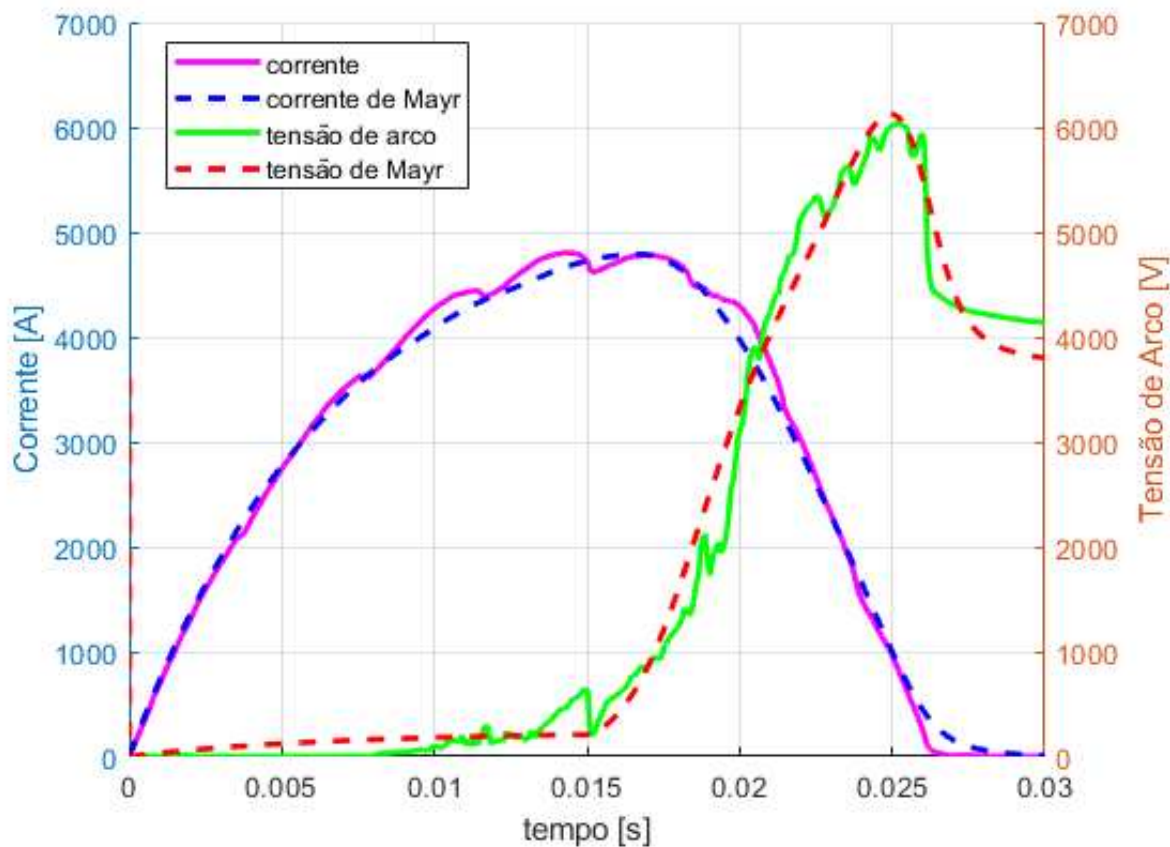
Os valores de resistência e indutância estimados para os experimentos, assim como a constante de tempo do circuito, são mostrados na Tabela 3.5. Importante notar que os valores apresentados anteriormente na Tabela 3.1 não são valores exatos, e que as constantes de tempo do circuito estão dentro de uma faixa de variação, conforme descrito em (ROJEK; SKRZYNIARZ, 2019).

Tabela 3.5 – Parâmetros dos circuitos simulados

Teste	R [Ω]	L [mH]	τ [ms]
1	0,63	5,0	7,9
2	0,63	9,2	14,6
3	2,4	22	9,2
4	2,4	43	17,9

O resultado da simulação do modelo de Mayr para o teste 1 e os parâmetros calculados para o modelo são apresentados na Figura 3.17 e na Tabela 3.6, respectivamente. Os demais resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

Figura 3.17 – Simulação do modelo Mayr



Fonte: Autor

Tabela 3.6 – Resultados da simulação para o modelo de Mayr

Método de Otimização	τ_m [ms]	P_0 [MW]	$\text{Erro}_{(custo)}$	R^2 (tensão)	$\text{Erro}_{(pico)}$
Algoritmo Genético	1,1475	21,8314	0,56	96,7%	1,4%

3.5 Considerações Adicionais

Conforme mostrado na Figura 3.17, o nível de adequação do modelo aos valores medidos é limitado pela complexidade da modelagem matemática do arco elétrico. No caso do modelo de Mayr, que é representado por uma equação diferencial de primeira ordem com duas constantes, ele apresenta um erro de 0,56, representado pela função custo, com um coeficiente de determinação (R^2) de 96,7% para a curva de tensão do arco, e um erro de pico de 1,4%. O valor do coeficiente de determinação indica a aderência entre os valores medidos e o resultado produzido pelo modelo, sendo que o erro de pico é o erro relativo entre o valor máximo da tensão de arco elétrico medido e o calculado pelo modelo.

Os cálculos do erro de pico e do coeficiente de determinação são mostrados a seguir:

$$\text{Erro}_{(pico)} = \frac{|U_{calc(max)} - U_{med(max)}|}{U_{med(max)}} \times 100 \quad (3.8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.9)$$

$$SST = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (3.10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.11)$$

Como existem modelos de arco de 2 e de 4 parâmetros, o coeficiente de determinação deve ser ajustado, conforme equação abaixo:

$$R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE}{SST} \quad (3.12)$$

onde SSE é a soma do erro quadrático, SST é a soma do quadrado total, n é o número de amostras e p é a quantidade de parâmetros do modelo.

As simulações apresentadas anteriormente foram realizadas por meio dos modelos de arco disponíveis na biblioteca *Arc Model Blockset* para *Simulink* (SCHAVEMAKER; SLUIS, 2002). No entanto, poucos programas do tipo EMT apresentam bibliotecas nativas com modelos acessíveis de arco elétrico, sendo necessário sua implementação via código. A simulação dos modelos de arco elétrico em outros softwares, como ATP e PSCAD, é mostrada nos Apêndices B e C.

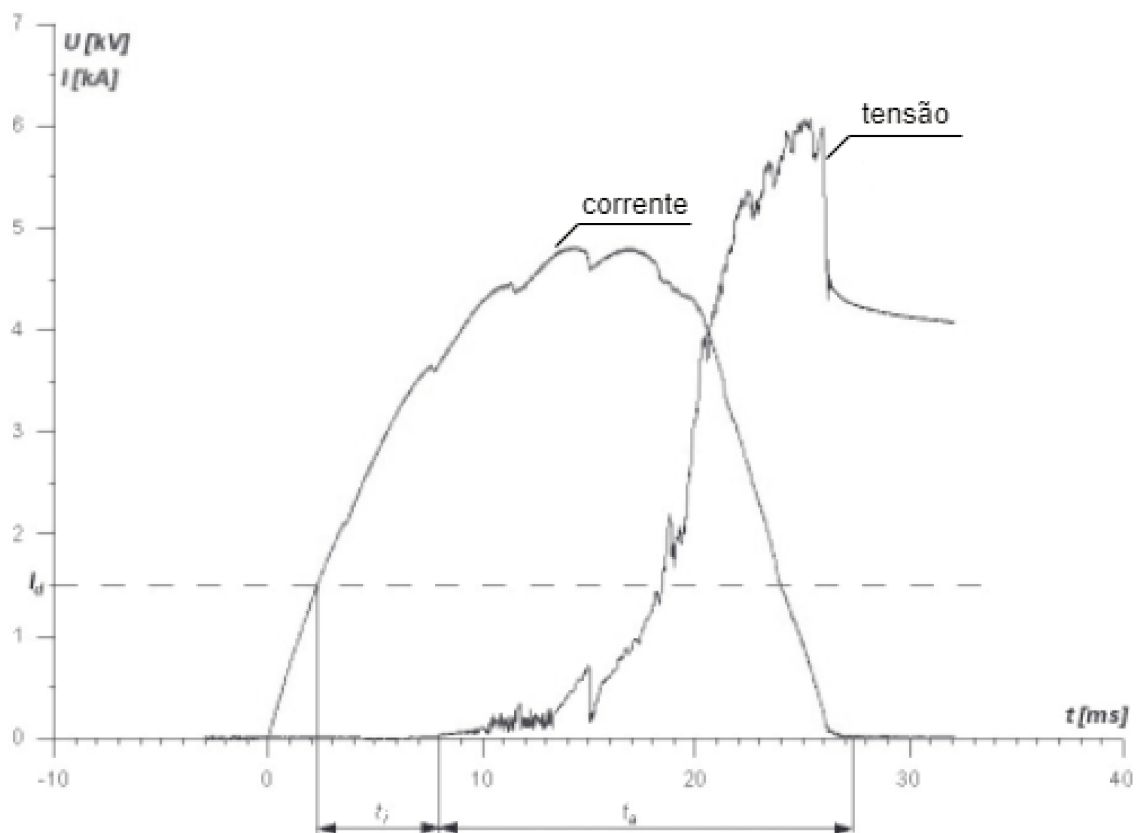
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais dos testes de curto-circuito juntamente com os resultados obtidos através de simulações. Diferentemente do capítulo anterior, onde a metodologia foi apresentada tomando o modelo de Mayr como exemplo, nesta ocasião foram considerados quatro modelos distintos de arco elétrico, dentre eles os modelos clássicos de dois parâmetros de Cassie e de Mayr, além do modelo de arco em série de Hadebank, e do modelo de Schwarz, cujos parâmetros são representados por funções. As simulações foram realizadas utilizando o Matlab e o Simulink.

4.1 Teste 1

Os resultados dos modelos de arco elétrico para as curvas de referência do teste 1 são mostrados a seguir:

Figura 4.1 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 1

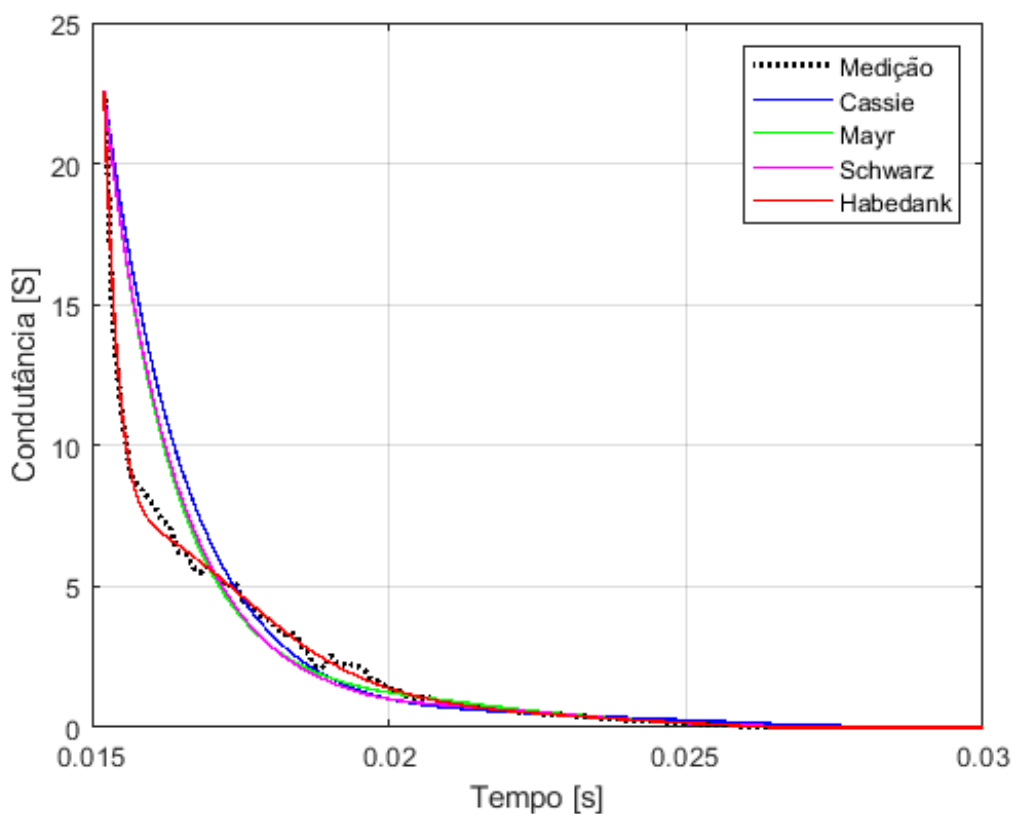


Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

Tabela 4.1 – Parâmetros do circuito do teste 1

Parâmetro	U_0 [V]	R [Ω]	L [mH]	τ [ms]	I_{ss} [A]
Valor	3600	0,63	5,0	7,9	5453

Figura 4.2 – Curvas de condutância ajustadas para o teste 1



Fonte: Autor

Tabela 4.2 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 1

Modelo de Arco	τ_C [ms]	U_0 [V]	τ_M [ms]	P_0 [MW]	Alfa (α)	Beta (β)	Erro (Custo)	R^2 (g_{arc})	R^2 (u_{arc})	Erro (pico)
Cassie	1,4441	6288,56	-	-	-	-	0,6687	85,92%	89,00%	17,27%
Mayr	-	-	1,1475	21,8314	-	-	0,5650	89,04%	96,72%	1,42%
Schwarz	-	-	1,1341	21,4361	3,96E-4	4,01E-4	0,5654	89,17%	96,52%	1,38%
Habedank	1,4123	5995,13	0,1846	2,2907	-	-	0,0837	99,69%	95,04%	2,71%

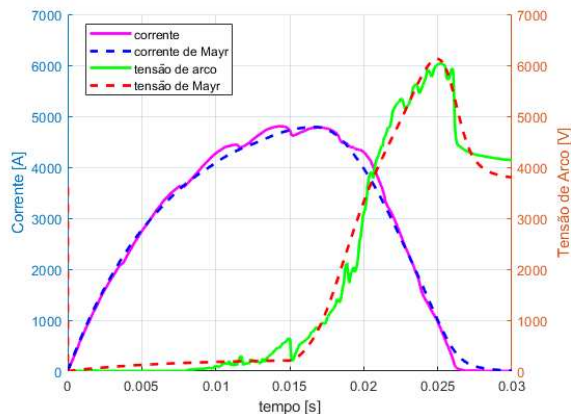
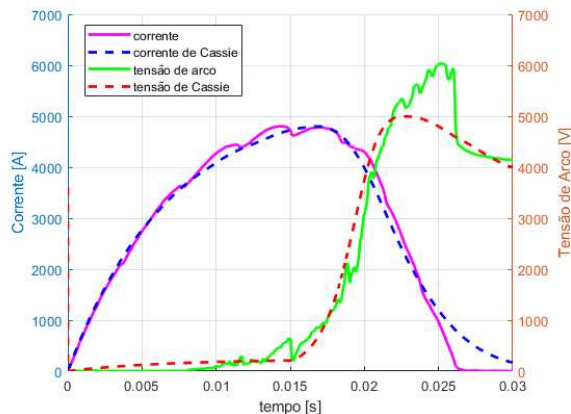
4.1.1 Curvas de tensão e corrente do teste 1

Os resultados da simulação dos modelos para o teste 1 são mostrados abaixo.

Figura 4.3 – Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 1

(a) Modelo de Cassie (1)

(b) Modelo de Mayr (1)

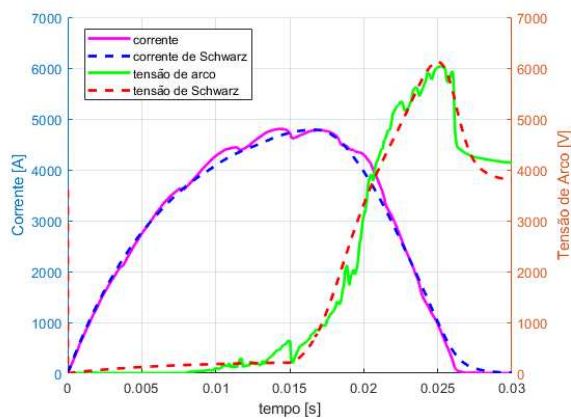
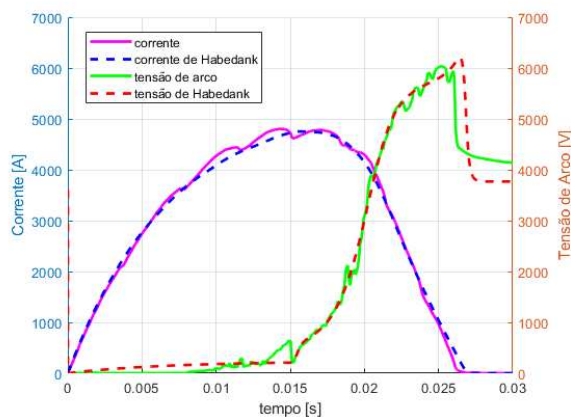


Fonte: Autor

Figura 4.4 – Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 1

(a) Modelo de Habedank (1)

(b) Modelo de Schwarz (1)

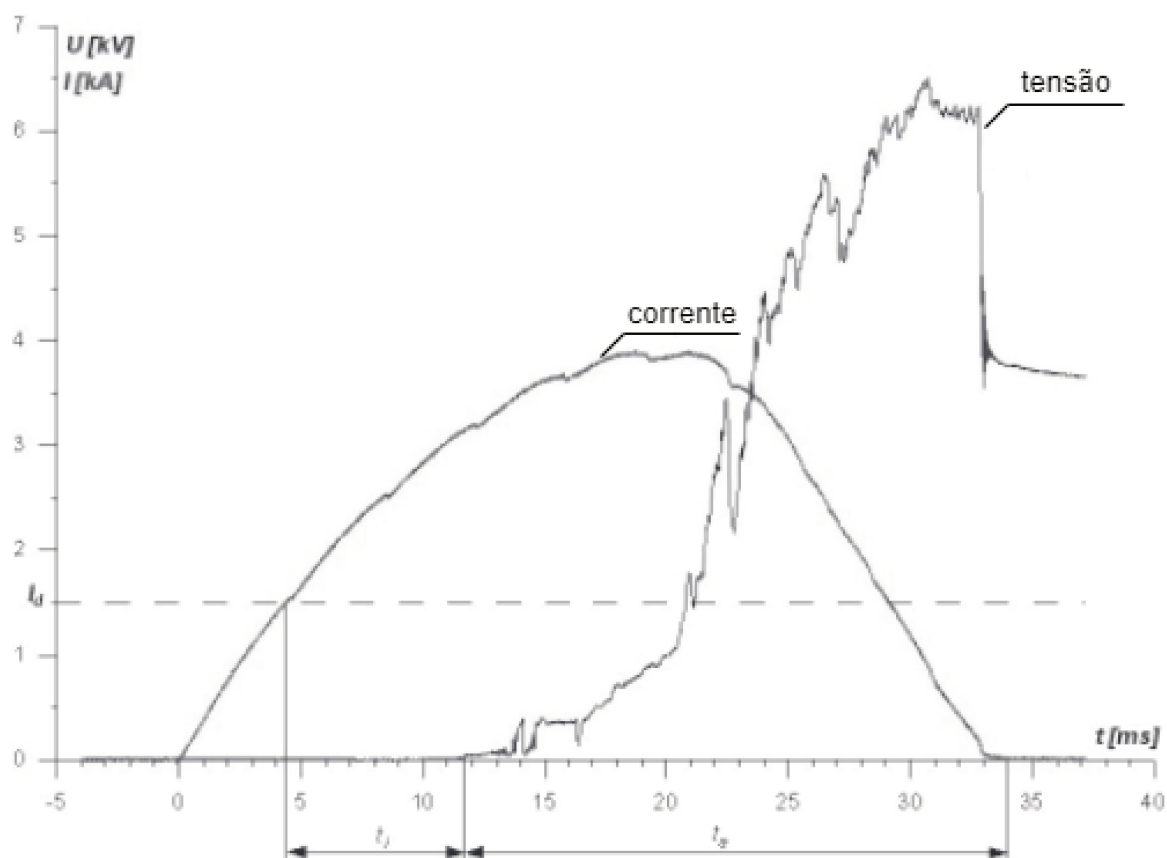


Fonte: Autor

4.2 Teste 2

Os resultados dos modelos de arco elétrico para as curvas de referência do teste 2 são mostrados a seguir:

Figura 4.5 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 2

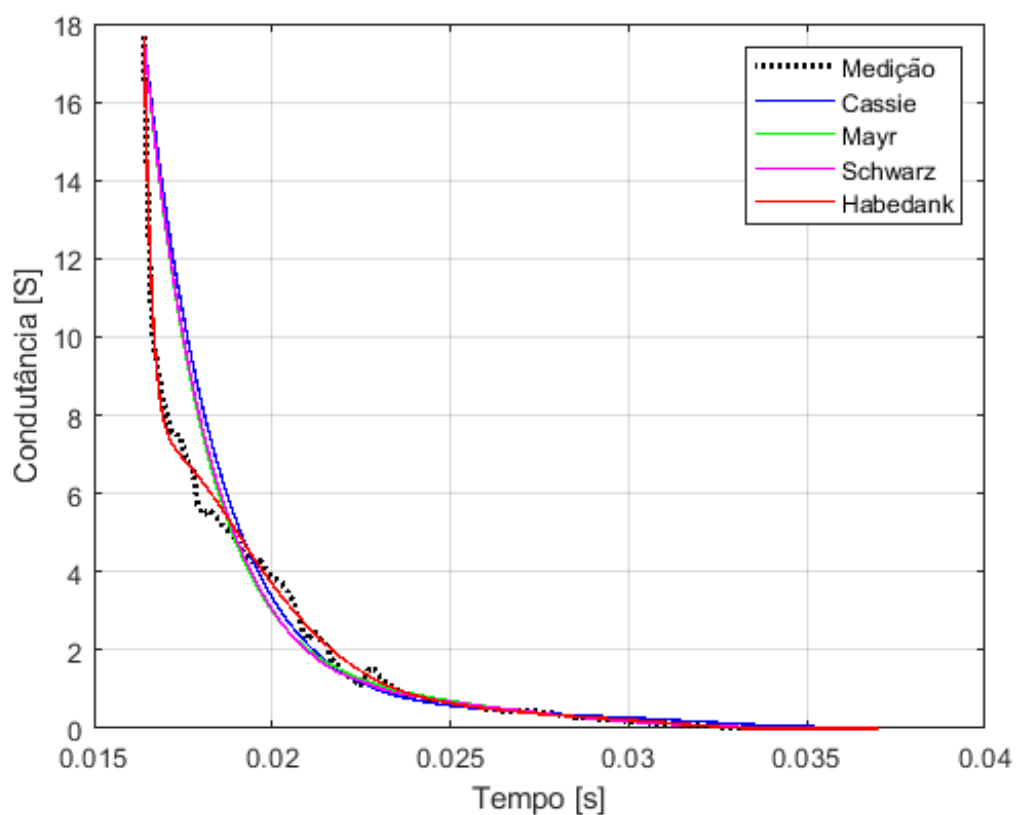


Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

Tabela 4.3 – Parâmetros do circuito do teste 2

Parâmetro	U_0 [V]	R [Ω]	L [mH]	τ [ms]	I_{ss} [A]
Valor	3600	0,63	9,2	14,6	5278

Figura 4.6 – Curvas de condutância ajustadas para o teste 2



Fonte: Autor

Tabela 4.4 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 2

Modelo de Arco	τ_C [ms]	U_0 [V]	τ_M [ms]	P_0 [MW]	Alfa (α)	Beta (β)	Erro (Custo)	R^2 (g_{arc})	R^2 (u_{arc})	Erro (pico)
Cassie	2,1419	6400,69	-	-	-	-	0,4939	87,70%	85,26%	18,23%
Mayr	-	-	1,8031	21,2373	-	-	0,4245	89,57%	94,51%	1,61%
Schwarz	-	-	1,7935	21,1900	11,93E-4	2,24E-4	0,4249	89,59%	94,64%	1,82%
Habedank	1,9575	6042,41	0,1777	1,3803	-	-	0,1018	99,41%	85,24%	0,74%

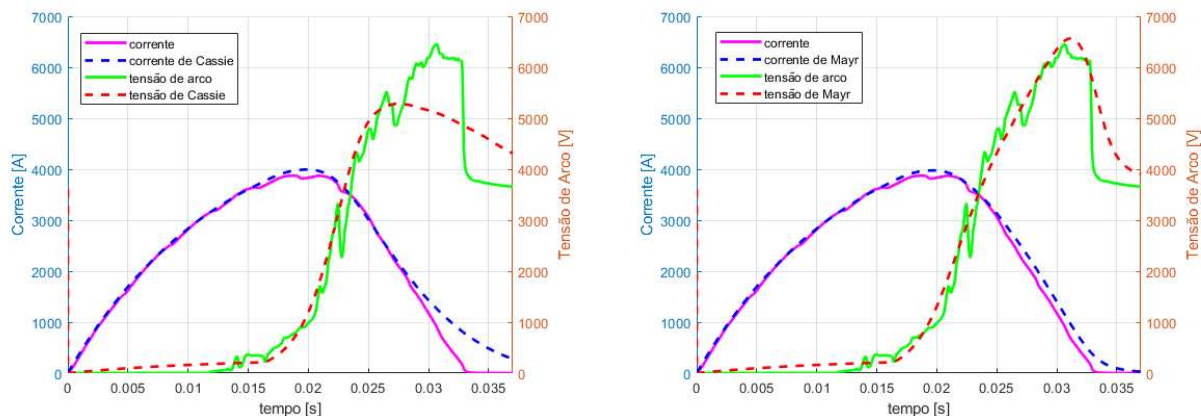
4.2.1 Curvas de tensão e corrente do teste 2

Os resultados da simulação dos modelos para o teste 2 são mostrados abaixo.

Figura 4.7 – Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 2

(a) Modelo de Cassie (2)

(b) Modelo de Mayr (2)

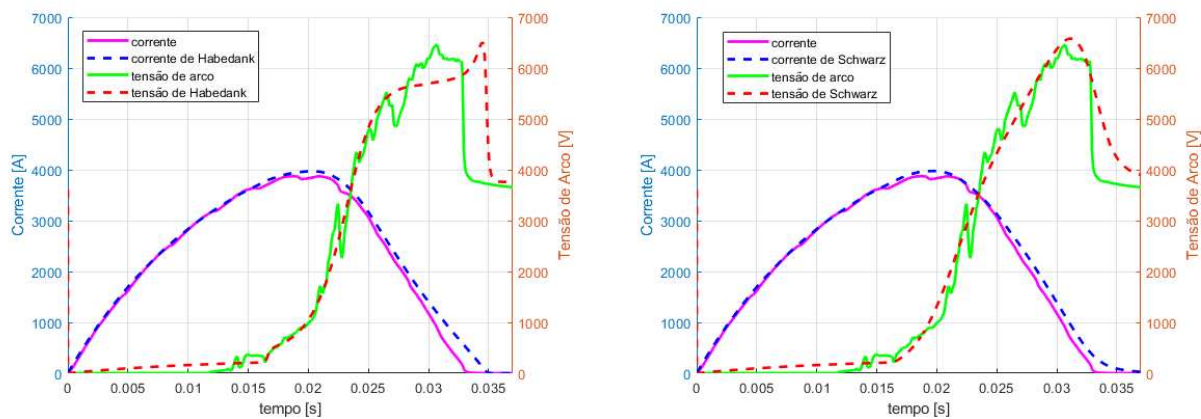


Fonte: Autor

Figura 4.8 – Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 2

(a) Modelo de Habedank (2)

(b) Modelo de Schwarz (2)

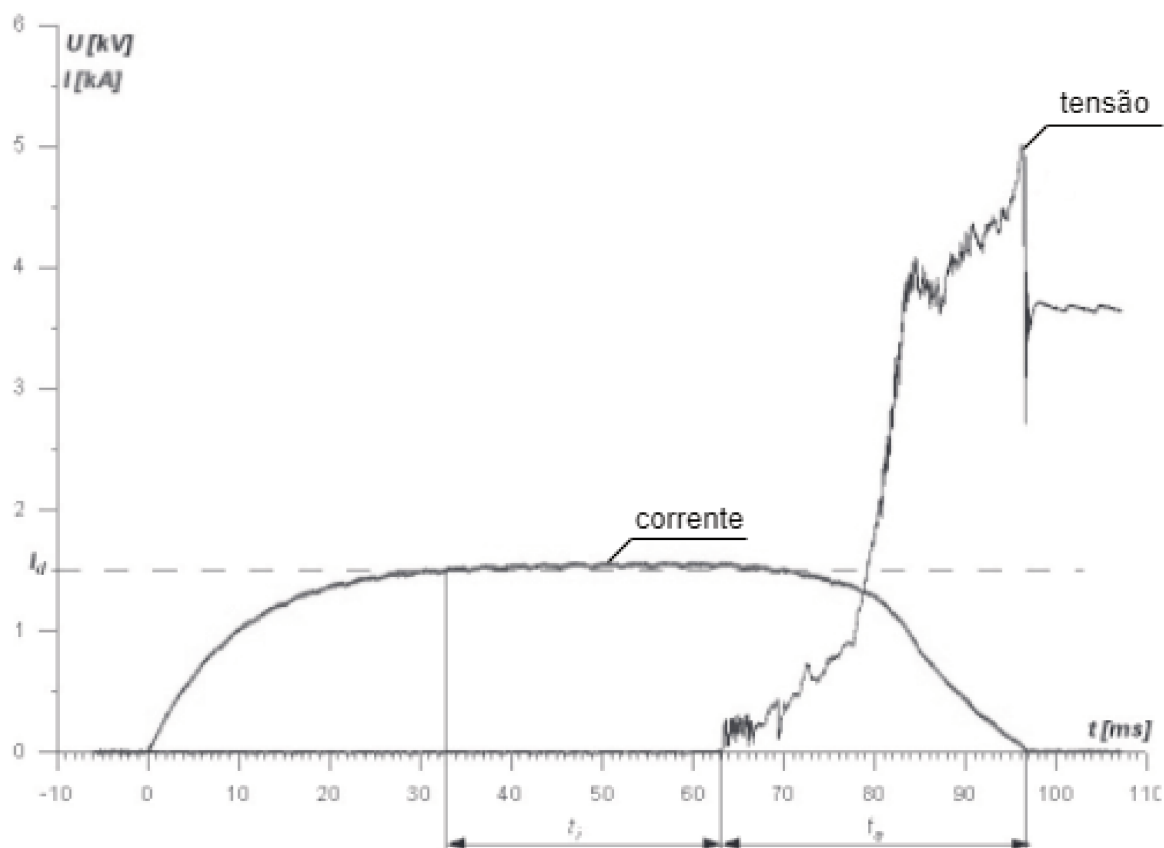


Fonte: Autor

4.3 Teste 3

Os resultados dos modelos de arco elétrico para as curvas de referência do teste 3 são mostrados a seguir:

Figura 4.9 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 3

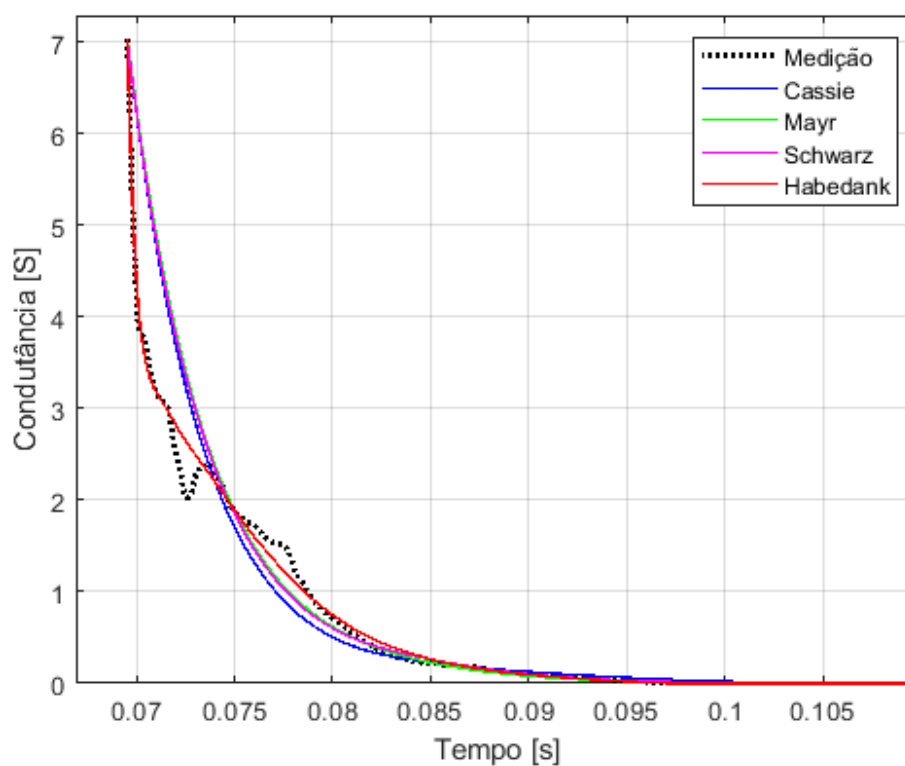


Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

Tabela 4.5 – Parâmetros do circuito do teste 3

Parâmetro	U_0 [V]	R [Ω]	L [mH]	τ [ms]	I_{ss} [A]
Valor	3600	2,4	22	9,2	1553

Figura 4.10 – Curvas de condutância ajustadas para o teste 3



Fonte: Autor

Tabela 4.6 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 3

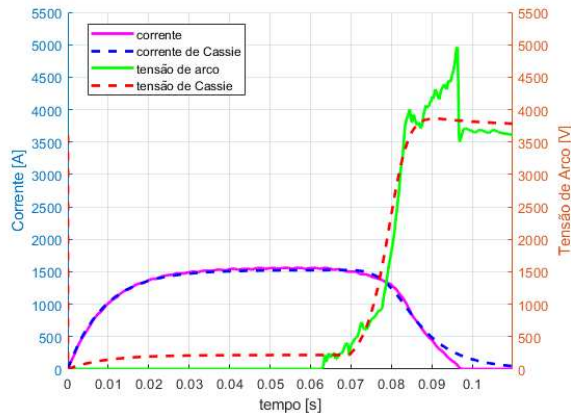
Modelo de Arco	τ_C [ms]	U_0 [V]	τ_M [ms]	P_0 [MW]	Alfa (α)	Beta (β)	Erro (Custo)	R^2 (g_{arc})	R^2 (u_{arc})	Erro (pico)
Cassie	3,8157	5140,88	-	-	-	-	0,1915	89,33%	92,38%	22,24%
Mayr	-	-	3,9920	16,5140	-	-	0,1776	89,21%	94,44%	3,20%
Schwarz	-	-	3,7015	8,6444	13,26E-4	87,96E-4	0,1723	89,77%	95,67%	6,69%
Habedank	3,8445	6132,21	0,3158	0,4843	-	-	0,0458	99,03%	95,91%	6,41%

4.3.1 Curvas de tensão e corrente do teste 3

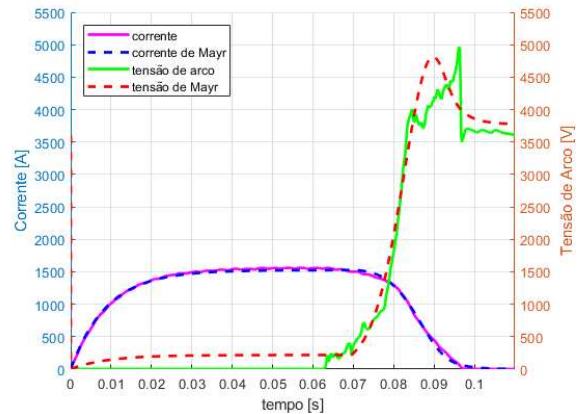
Os resultados da simulação dos modelos para o teste 3 são mostrados abaixo.

Figura 4.11 – Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 3

(a) Modelo de Cassie (3)



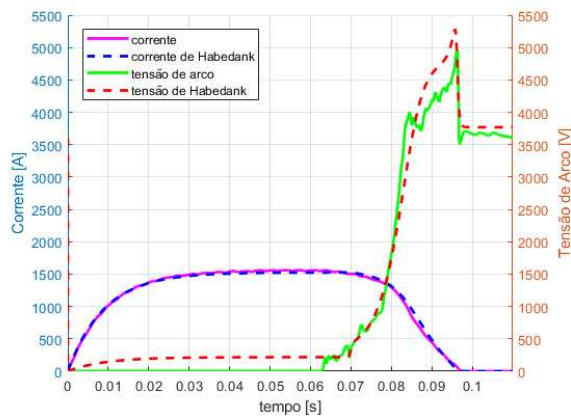
(b) Modelo de Mayr (3)



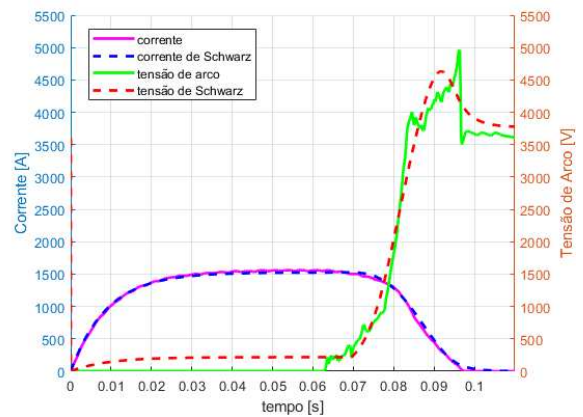
Fonte: Autor

Figura 4.12 – Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 3

(a) Modelo de Habedank (3)



(b) Modelo de Schwarz (3)

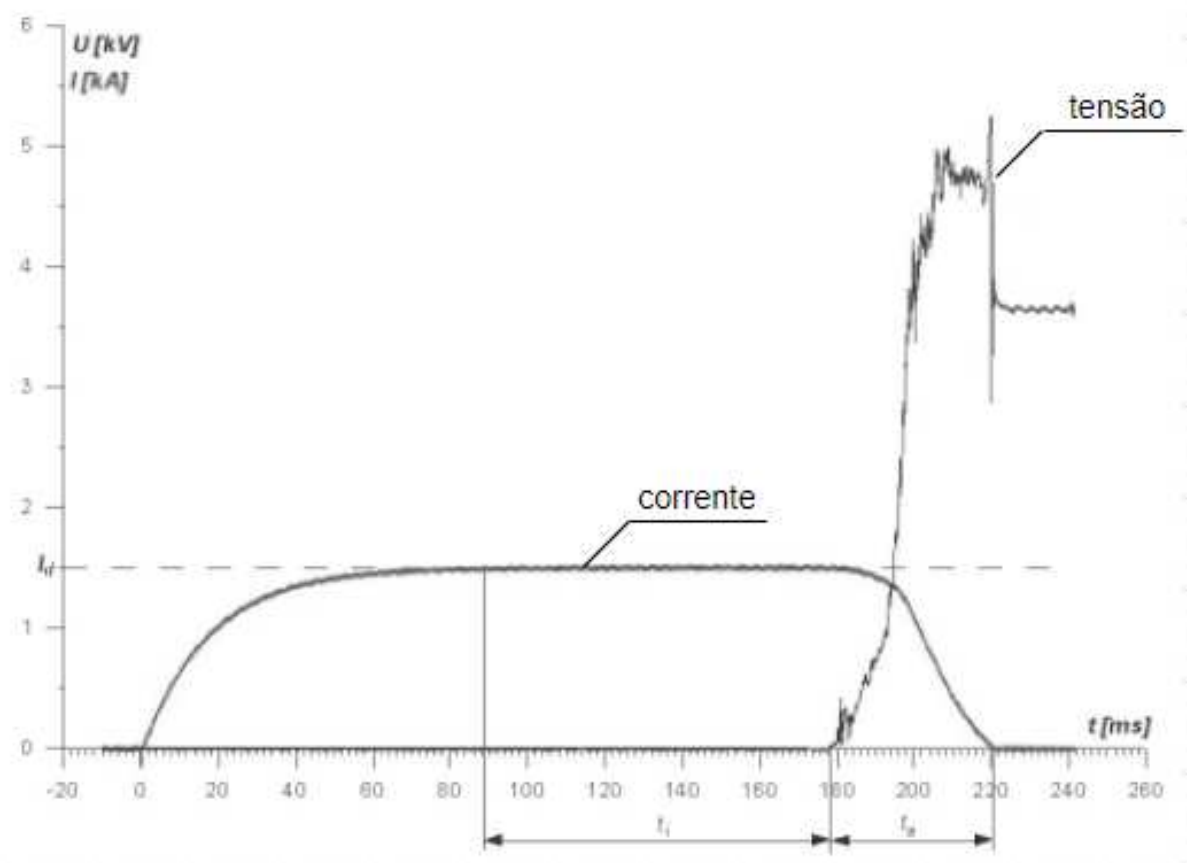


Fonte: Autor

4.4 Teste 4

Os resultados dos modelos de arco elétrico para as curvas de referência do teste 4 são mostrados a seguir:

Figura 4.13 – Curvas de tensão e corrente de arco para o teste 4

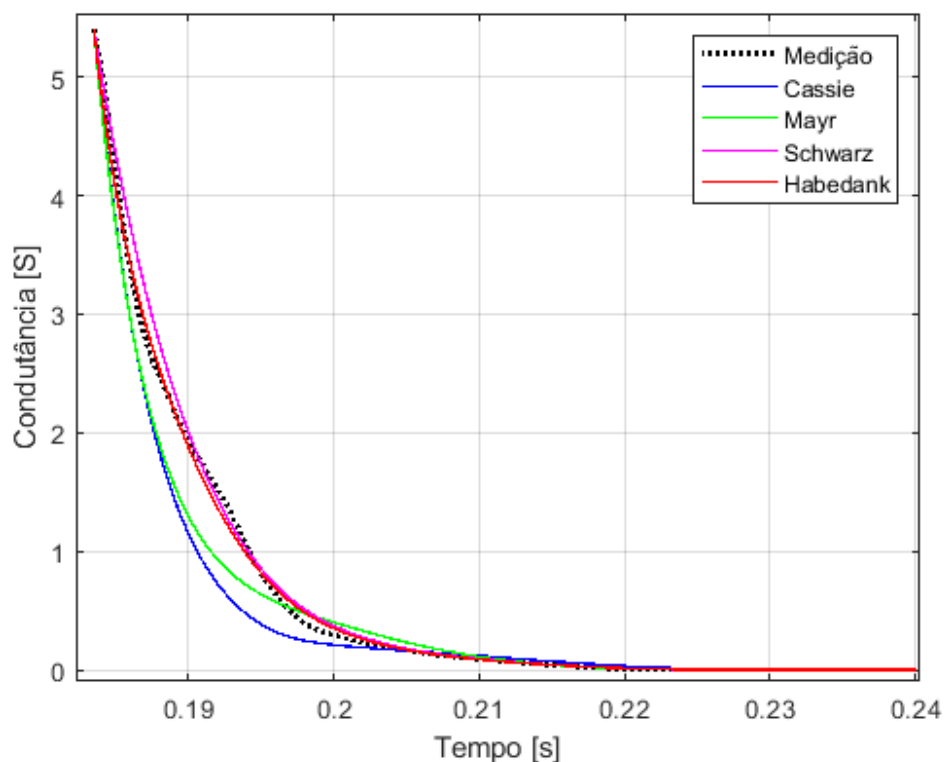


Fonte: Adaptado de Rojek (2015)

Tabela 4.7 – Parâmetros do circuito do teste 4

Parâmetro	U_0 [V]	R [Ω]	L [mH]	τ [ms]	I_{ss} [A]
Valor	3600	2,4	43	17,9	1520

Figura 4.14 – Curvas de condutância ajustadas para o teste 4



Fonte: Autor

Tabela 4.8 – Resultado dos modelos de arco elétrico para o teste 4

Modelo de Arco	τ_C [ms]	U_0 [V]	τ_M [ms]	P_0 [MW]	Alfa (α)	Beta (β)	Erro (Custo)	R^2 (g_{arc})	R^2 (u_{arc})	Erro (pico)
Cassie	4,1499	5147,71	-	-	-	-	0,1515	91,02%	81,99%	11,42%
Mayr	-	-	3,6600	4,5800	-	-	0,1182	93,75%	84,03%	8,70%
Schwarz	-	-	5,4468	36,6029	0,1497	0,8937	0,0438	99,31%	96,84%	5,02%
Habedank	4,7300	6770,00	2,0000	0,3600	-	-	0,0279	99,73%	97,15%	5,96%

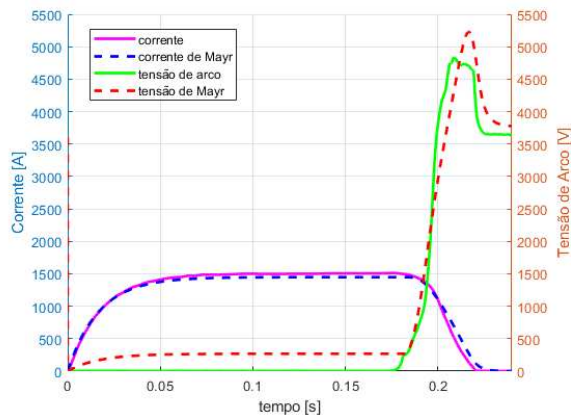
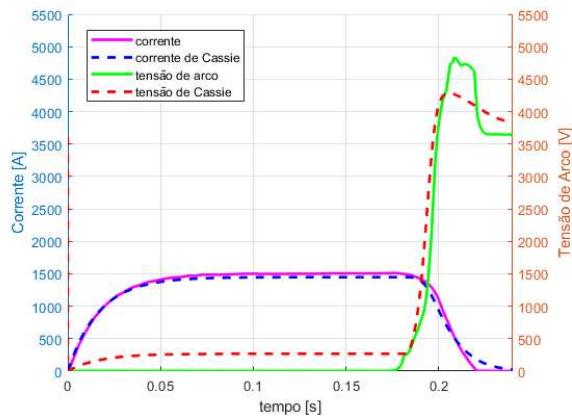
4.4.1 Curvas de tensão e corrente do teste 4

Os resultados da simulação dos modelos para o teste 4 são mostrados abaixo.

Figura 4.15 – Simulação dos modelos de Cassie e Mayr - Teste 4

(a) Modelo de Cassie (4)

(b) Modelo de Mayr (4)

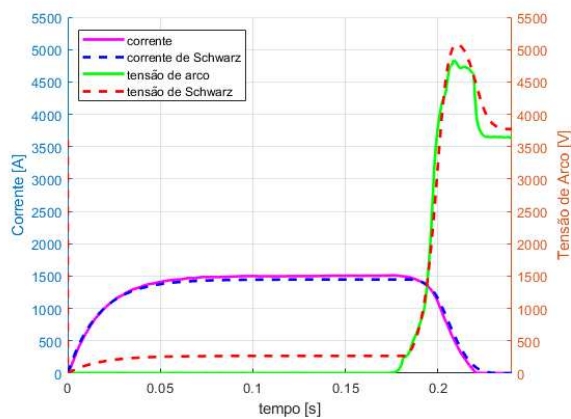
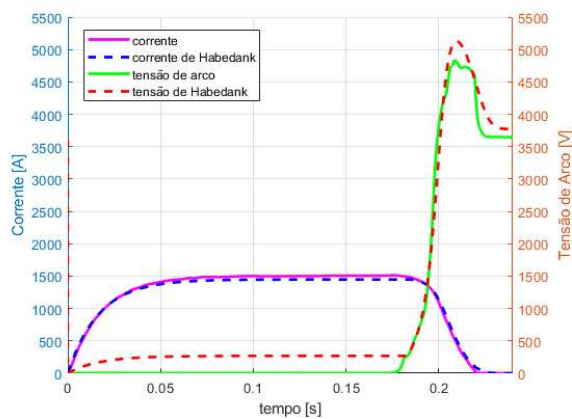


Fonte: Autor

Figura 4.16 – Simulação dos modelos de Habedank e Schwarz - Teste 4

(a) Modelo de Habedank (4)

(b) Modelo de Schwarz (4)



Fonte: Autor

4.5 Análise dos Resultados

A Tabela 4.9 expõe um resumo dos resultados apresentados anteriormente para cada teste. Como pode ser visto, do ponto de vista do processo de otimização, ou seja, do modelo que possui a melhor representação do sinal de condutância medido, aquele que obteve o melhor desempenho foi o modelo de Habedank, atingindo os menores valores de erro, e conseqüentemente, níveis superiores a 99% para o coeficiente de determinação da condutância (R^2) em todos os testes.

No entanto, quando consideramos o desempenho dos modelos em relação à representação do sinal de tensão do arco, o modelo de Schwarz alcançou um desempenho médio ligeiramente superior ao modelo de Habedank. Estes modelos apresentam performances superiores aos modelos de Cassie e Mayr devido a maior quantidade de parâmetros, que se traduz em uma melhor capacidade de ajuste aos valores medidos.

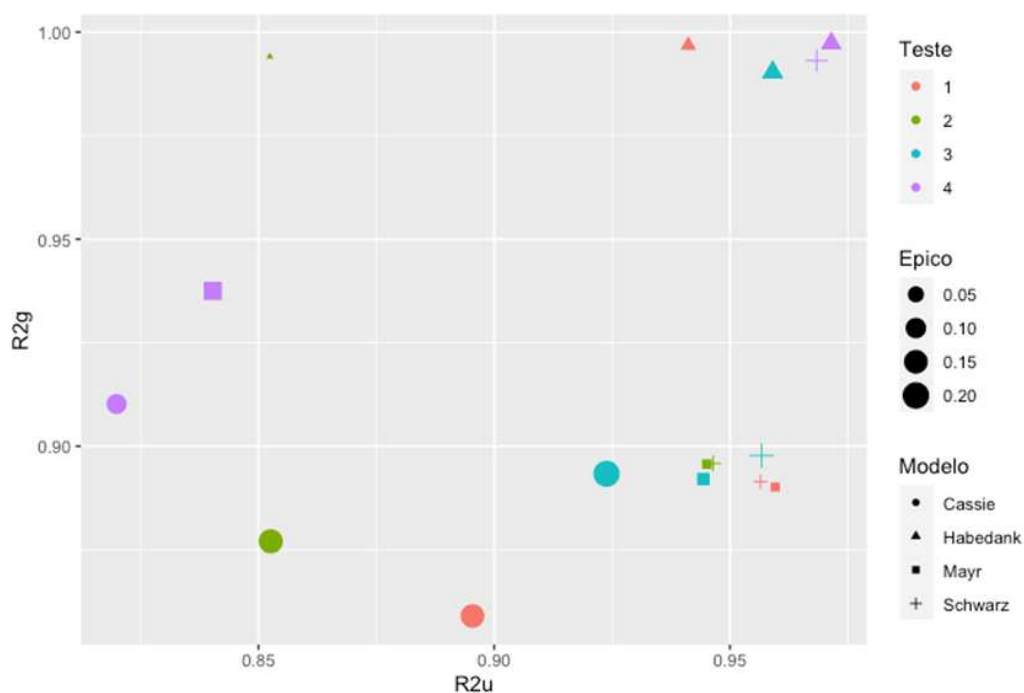
A divergência entre os resultados da otimização e da simulação pode ter sido causada pelos parâmetros do circuito simulado, tendo em vista que foi necessário estimar os valores de resistência e indutância do circuito para que a constante de tempo e o valor de pico esperado da corrente fossem similares aos valores medidos. Como a forma da tensão de arco depende da fidelidade na representação do circuito de teste, estas aproximações podem ter comprometido o desempenho do modelo de Habedank.

Tabela 4.9 – Resultado dos experimentos

Teste Nº	Modelo de Arco	τ_C [ms]	U_o [V]	τ_M [ms]	Po [MW]	Alfa (α)	Beta (β)	Erro (custo)	R^2 (g_{arc})	R^2 (u_{arc})	Erro (pico)
1	Cassie	1,4441	6288,56	-	-	-	-	0,6687	85,92%	89,00%	17,27%
	Mayr	-	-	1,1475	21,8314	-	-	0,5650	89,04%	96,72%	1,42%
	Schwarz	-	-	1,1341	21,4361	3,96E-4	4,01E-4	0,5654	89,17%	96,52%	1,38%
	Habedank	1,4123	5995,13	0,1846	2,2907	-	-	0,0837	99,69%	95,04%	2,71%
2	Cassie	2,1419	6400,69	-	-	-	-	0,4939	87,70%	85,26%	18,23%
	Mayr	-	-	1,8031	21,2373	-	-	0,4245	89,57%	94,51%	1,61%
	Schwarz	-	-	1,7935	21,1900	11,93E-4	2,24E-4	0,4249	89,59%	94,64%	1,82%
	Habedank	1,9575	6042,41	0,1777	1,3803	-	-	0,1018	99,41%	85,24%	0,74%
3	Cassie	3,8157	5140,88	-	-	-	-	0,1915	89,33%	92,38%	22,24%
	Mayr	-	-	3,9920	16,5140	-	-	0,1776	89,21%	94,44%	3,20%
	Schwarz	-	-	3,7015	8,6444	13,26E-4	87,96E-4	0,1723	89,77%	95,67%	6,69%
	Habedank	3,8445	6132,21	0,3158	0,4843	-	-	0,0458	99,03%	95,91%	6,41%
4	Cassie	4,1499	5147,71	-	-	-	-	0,1515	91,02%	81,99%	11,42%
	Mayr	-	-	3,6600	4,5800	-	-	0,1182	93,75%	84,03%	8,70%
	Schwarz	-	-	5,4468	36,6029	0,1497	0,8937	0,0438	99,31%	96,84%	5,02%
	Habedank	4,7300	6770,00	2,0000	0,3600	-	-	0,0279	99,73%	97,15%	5,96%

Uma forma alternativa de representação dos resultados é mostrada no gráfico da Figura 4.17. O eixo das abscissas representa o coeficiente de determinação da tensão do arco e o eixo das ordenadas o da condutância. Os testes estão discriminados pela cor da forma, que difere de acordo com o modelo de arco e cujo tamanho representa o erro de pico.

Figura 4.17 – Resultados dos testes



Fonte: Autor

De uma maneira geral, com exceção do teste 2, os resultados do modelo de Habedank estão concentrados na parte superior direita do gráfico, indicando que o coeficiente de determinação da condutância é próximo de 1 (100%), e no caso da tensão do arco, gira em torno da linha de 95%. Da mesma forma, os resultados dos modelos de Mayr e Schwarz estão concentrados na parte inferior direita, próximo a linha de 90% para o desempenho na representação da condutância, e por volta de 95% para a tensão, exceto pelo teste 4. O modelo de Cassie apresentou resultados inferiores aos demais modelos para a maioria dos testes propostos.

As tendências descritas acima podem ser verificadas pela média aritmética do desempenho dos modelos entre os testes, de acordo com a Tabela 4.10. Conforme mencionado, o modelo de Habedank apresenta valores médios de 99,5% para o coeficiente R^2 da condutância e de 93,3% para tensão, com erro de pico médio inferior a 4,0%, enquanto os modelos de Mayr e Schwarz apresentam índices de desempenho de 90,4% e 92,0% para condutância, e de 92,4% e 95,9% para a tensão de arco, respectivamente, com erro de pico médio inferior a 3,8% para ambos.

Tabela 4.10 – Desempenho médio dos modelos de arco elétrico

Modelo de Arco	Erro (Custo)	R^2 (g_{arc})	R^2 (u_{arc})	Erro (pico)
Cassie	0,3764	88,49%	87,16%	17,29%
Mayr	0,3213	90,39%	92,43%	3,73%
Schwarz	0,3016	91,96%	95,92%	3,73%
Habedank	0,0652	99,47%	93,34%	3,96%

Os valores médios apresentados acima confirmam a superioridade dos modelos de Schwarz e Habedank na representação dos dados experimentais. No entanto, dentre os modelos de dois parâmetros de Cassie e Mayr, vale destacar o desempenho alcançado pelo modelo de Mayr. Mesmo com um ajuste próximo de 90,0% para o sinal da condutância, o nível médio de ajuste para a curva de tensão do arco foi de quase 93,0%, sendo que o erro médio de pico foi o mesmo apresentado pelo modelo de Schwarz. Isto indica que para uma representação simplificada, o modelo de Mayr possui um bom custo-benefício em termos de implementação, por se tratar de um modelo definido por uma equação diferencial de primeira ordem com apenas dois parâmetros a serem ajustados.

4.6 Considerações Adicionais

Este capítulo mostrou que os modelos de arco elétrico podem ser utilizados de maneira satisfatória na representação de transitórios em sistemas de corrente contínua. No entanto, os parâmetros dos modelos experimentaram variações entre os testes analisados. Podemos dizer que os experimentos foram bem ajustados, mas não que os parâmetros do modelo de arco são robustos. Para isto seria necessário utilizar um número elevado de experimentos com as condições de ensaio conhecidas, o que não foi possível na presente pesquisa.

Dos resultados obtidos é possível identificar uma correlação entre os parâmetros do arco elétrico e do circuito de teste, ou seja, uma vez alteradas as características do circuito, os modelos de arco elétrico devem ser ajustados novamente, limitando assim sua aplicação para estimar os níveis de sobretensão de uma rede.

Todavia, apesar do número de testes utilizados neste trabalho não permitir uma análise aprofundada a respeito da influência dos parâmetros do circuito nos modelos de arco elétrico, é possível apontar algumas tendências preliminares. A Tabela 4.11 mostra a variação da constante de tempo e da corrente de pico esperada entre os testes. É possível notar que a variação da corrente de pico entre os testes 1 e 2 é muito pequena quando

comparada a variação da constante de tempo, da mesma forma que entre os testes 3 e 4, podendo ser considerada constante para uma análise menos aprofundada.

Tabela 4.11 – Variação dos parâmetros do circuito de teste

Teste	τ	$\Delta\tau$	I_{ss}	ΔI_{ss}
Nº	[ms]	[%]	[A]	[%]
1	7,9	84,81%	5453	-3,21%
2	14,6		5278	
3	9,2	94,57%	1553	-2,12%
4	17,9		1520	

No caso dos testes 1 e 2, onde a corrente de curto é eliminada antes de atingir o seu valor máximo, observa-se uma variação maior nas constantes de tempo dos modelos em relação aos demais parâmetros, conforme mostrado na Tabela 4.12. As constantes relacionadas a tensão de arco de Cassie (U_0) e a potência de resfriamento de Mayr (P_0) apresentaram variações inferiores a 3%, enquanto suas constantes de tempo exibiram variações de 48% e 57%, respectivamente. Da mesma forma, os modelos de Schwarz e Habedank apresentaram comportamento semelhante para estas variáveis, com exceção da potência de resfriamento no modelo de Habedank. Este padrão pode indicar que existe uma correlação forte entre a constante de tempo do circuito e as constantes de tempo dos modelos, enquanto outros parâmetros, como U_0 e P_0 , podem ter uma relação mais significativa com as características do disjuntor, como por exemplo o tamanho e a forma da câmara de extinção.

Tabela 4.12 – Variação dos parâmetros dos modelos para testes 1 e 2

Modelo de Arco	Teste Nº	τ_C [ms]	U_0 [V]	τ_M [ms]	P_0 [MW]	Alfa (α)	Beta (β)	$\Delta\tau_C$ [%]	ΔU_0 [%]	$\Delta\tau_M$ [%]	ΔP_0 [%]	$\Delta\alpha$ [%]	$\Delta\beta$ [%]
Cassie	1	1,4441	6288,56	-	-	-	-	48,32%	1,78%	-	-	-	-
	2	2,1419	6400,69	-	-	-	-						
Mayr	1	-	-	1,1475	21,8314	-	-	-	-	57,13%	-2,72%	-	-
	2	-	-	1,8031	21,2373	-	-						
Schwarz	1	-	-	1,1341	21,4361	3,96E-4	4,01E-4	-	-	58,14%	-1,15%	201,26%	-44,14%
	2	-	-	1,7935	21,1900	11,93E-4	2,24E-4						
Habedank	1	1,4123	5995,13	0,1846	2,2907	-	-	38,60%	0,79%	-3,73%	-39,74%	-	-
	2	1,9575	6042,41	0,1777	1,3803	-	-						

Contudo, este mesmo comportamento não ocorre entre os testes 3 e 4. Portanto, para verificar este tipo de correlação é necessário um número maior de testes, além

destes apresentados aqui, possibilitando assim estabelecer uma relação entre as variáveis do circuito e as variáveis dos modelos de arco elétrico. Um trabalho semelhante foi desenvolvido por Ohtaka, Kertész e Smeets (2017) para disjuntores CA, onde foi validado um novo modelo de arco elétrico utilizando testes de interrupção de curto-circuito em disjuntores de alta tensão de uma linha curta. Este tipo de trabalho poderia servir de base para que fabricantes de disjuntores validassem um modelo de arco elétrico e permitissem que engenheiros possam estudar e calcular os níveis de sobretensão esperados para uma rede CC.

5 CONCLUSÕES

Os modelos de arco elétrico do tipo caixa-preta são amplamente estudados na representação de transitórios em sistemas de corrente alternada, no entanto sua aplicação em sistemas de corrente contínua de média tensão ainda é pouco conhecida. Este trabalho mostra a aplicação de alguns dos principais modelos de arco elétrico na representação de curto-circuito em um sistema de tração ferroviária protegido por um disjuntor de corrente contínua.

Dentre os modelos de arco apresentados, os modelos clássicos de Cassie e Mayr apresentam uma capacidade de adaptação limitada aos dados experimentais, uma vez que sua estrutura é composta por equações diferenciais ordinárias de apenas 2 parâmetros constantes, limitando o valor médio do coeficiente de determinação da condutância em torno de 90% para os casos estudados. Para uma representação mais próxima dos testes em laboratórios, é necessário aumentar a complexidade dos modelos, como é o caso do modelo de arco em série de Habedank, que é uma combinação dos modelos Cassie e Mayr, e também do modelo de Schwarz, que considera uma variação exponencial da condutância. Ambos possuem quatro parâmetros, o que lhes permite uma capacidade superior de ajuste às curvas de testes, especialmente no caso do modelo de Habedank, que atinge valores de R^2 acima 99% para a condutância em todos os testes.

No caso da representação da forma de onda da tensão do arco e do valor de pico, tanto o modelo de Habedank como os modelos de Mayr e Schwarz alcançaram resultados satisfatórios, apresentando um valor médio para o coeficiente de determinação da tensão do arco acima de 92% e um erro médio de pico inferior a 4%. Aqui vale destacar a performance do modelo de Mayr, que apesar de sua simplicidade em relação aos outros dois modelos, apresentou resultados semelhantes, podendo ser considerado como um bom custo-benefício em termos de implementação e desempenho.

Contudo, embora seja possível identificar de maneira apropriada os parâmetros dos modelos de arco para um determinado experimento, verificou-se a existência de uma correlação entre os parâmetros dos modelos e os parâmetros do circuito de teste. Por este motivo, é necessário um volume maior de testes em condições bem conhecidas para extrair os parâmetros reais do arco e poder estimá-los de acordo com as características do disjuntor que será utilizado.

Posto isto, a metodologia de cálculo apresentada neste trabalho utilizando algoritmos genéticos poderia ser potencialmente utilizada por fabricantes de disjuntores para validar um modelo de arco, e assim permitir que engenheiros utilizem estes dados para estimar o nível de sobretensão esperado em uma rede de corrente contínua. A reprodução

de um experimento consiste em um passo importante para a validação de um modelo de arco elétrico robusto, que simule a resposta do disjuntor de forma consistente e que possa ser utilizado para qualquer circuito.

Adicionalmente, a implementação computacional dos modelos do tipo caixa-preta é relativamente simples comparada aos modelos físicos, sendo que alguns softwares já possuem bibliotecas desenvolvidas para utilização, como no caso do Matlab. No entanto, mesmo que isso não ocorra, a presença de uma linguagem própria, como a linguagem MODELS do ATP, permite ao usuário desenvolver os modelos de arco elétrico de maneira simples e com baixo esforço computacional.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- a) Expandir o estudo para outros modelos de arco elétrico, tais como os modelos de KEMA, Schavemaker, Thiel, Portela, dentre outros. Da mesma forma, buscar também outras métricas para avaliação do desempenho dos modelos de arco, além do coeficiente de determinação e do erro de pico;
- b) Realizar o procedimento proposto neste trabalho para uma quantidade elevada de testes, permitindo analisar a correlação entre os parâmetros dos modelos arco e o circuito elétrico. O objetivo final seria validar um modelo de arco que permitisse realizar estudos de sobretensões em sistemas de corrente contínua;
- c) Desenvolver um software de cálculo dos parâmetros do arco elétrico e simulação das curvas de curto-circuito para diferentes modelos de arco. Este tipo de ferramenta permitiria maior praticidade em estudos de sobretensões CC, podendo adotar um banco de dados de armazenagem de curvas de medição para diferentes modelos de disjuntor, facilitando a comparação entre os resultados simulados e as curvas reais. Adicionalmente, poderiam ser implementadas uma ampla variedade de índices de desempenho e de ferramentas de análise estatísticas, proporcionando a realização de análises complexas de maneira rápida e eficiente; e
- d) Estudar outros modelos de disjuntores apresentados de forma sucinta neste trabalho, como os disjuntores híbridos, onde além do arco elétrico, existem outros elementos que contribuem para a extinção da corrente de falta. Este trabalho permitiria comparar diferentes mecanismos de interrupção de corrente em sistemas CC.

Referências

- ABB. Medium voltage direct current applications. *Technical Application Papers No. 24*, n. 24, p. 52, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 34, 35 e 38.
- ABB SACE S.p.A. *ABB Low Voltage Circuit-Breakers for Direct Current Applications*. 2007. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 23, 30 e 31.
- ABNT NBR IEC 60947-2. Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão Parte 2: Disjuntores. 2013. Citado na página 32.
- AMSINCK, R. Verfahren zur Ermittlung der das Ausschaltverhalten bestimmenden Lichtbogenkenngrößen. 1977. Citado na página 45.
- ANSI/IEEE STANDARD C37.14. Ieee standard for low-voltage dc power circuit breakers used in enclosures. 1972. Citado na página 20.
- ASENCIOS, O. W. G. *Identificação dos parâmetros do arco elétrico através da estimação de estados e parâmetros*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Citado na página 54.
- AVDONIN, A. V. et al. Some problems of EHV and UHV air-blast circuit breakers. *CIGRE 1980 Session*, 1980. Citado na página 43.
- BALESTRERO, A. et al. Black Box Modeling of Low-Voltage Circuit Breakers. v. 25, n. 4, p. 2481–2488, 2010. Citado na página 65.
- BIZJAK, G.; ZUNKO, P. Circuit breaker model for digital simulation based on mayr's and cassie's differential arc equations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 3, 1995. Citado na página 43.
- BROWNE, T. E. A Study of A-C Arc Behavior Near Current Zero by Means of Mathematical Models. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 67, p. 141–153, 1948. Citado na página 39.
- CÂMARA, A. d. S. B. *Modelagem de arco elétrico no ar. Aplicações em sistemas de potência*. Tese (Tese de Doutorado) — COPPE/UFRJ, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 53.
- CARVALHO, A. C. C. D. et al. *Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência*. [S.l.]: EDUFF, 1995. Citado na página 55.
- CASSIE, A. M. Arc rupture and circuit severity: a new theory. *CIGRE report*, 1939. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- Cigré Working Group 13.01. *State of the art of circuit-breaker modelling*. 1998. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.
- COLEMAN, T. F.; ZHANG, Y. Optimization toolbox user's guide. 2020. Citado na página 51.

- DAS, J. C. *Short-Circuits in AC and DC Systems: ANSI, IEEE, and IEC Standards*. [S.l.]: CRC Press, 2017. Citado na página 20.
- DOERRY, N. Next generation integrated power systems (ngips) for the future fleet. In: *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 150, p. 200–250. Citado na página 16.
- DOKE, J. Grabit. *The MathWorks MatLab Central Website*, 2020. Citado na página 62.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 4, p. 388–399, 1969. Citado na página 110.
- FROST, L. S. Dynamic arc analysis of short-line fault tests for accurate circuit breaker performance specification. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 478–484, 1978. Citado na página 39.
- GE, G. E. *GE Industrial Power System Data Book*. [S.l.: s.n.], 1978. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- GE, G. E. High Speed Circuit Breakers BWS - User Manual. n. 07, p. 0–49, 2000. Citado na página 59.
- GHEZZI, L.; BALESTRERO, A. *Modeling and Simulation of Low Voltage Arcs*. Tese (Tese de Doutorado) — TU Delft, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 63.
- GIMENEZ, W. *La simulación del arco eléctrico*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 50.
- GIMÉNEZ, W.; HEVIA, O. Method to determine the parameters of the electric arc from test data. *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 1999 (IPST 1999)*, 1999. Citado na página 52.
- GLINKOWSKI, M. T.; TAKANASHI, K. Parameter Optimization of Cassie-Mayer Equation for SF6 Arc Modeling. *Proceedings of North American Power Symposium*, Boston, 1996. Citado na página 51.
- HABEDANK, U. Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-Circuit Breaking Tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 4, p. 1921–1925, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- IEC 61660-1. Short-circuit currents in dc auxiliary installations in power plants and substations. 1997. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 23.
- JIANG, S. Breaker arc. *Canada: Manitoba HVDC Research Centre*, 2013. Citado na página 108.
- KONG, W. Y. Review of dc circuit breakers for submarine applications. 2012. Citado na página 32.
- LIM, S.-W. et al. Simulation Analysis of DC Arc in Circuit Breaker Applying with Conventional Black Box Arc Model. *2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) Oct. 25-28, 2015 Busan, Korea*, p. 332–336, 2015. Citado na página 65.

- LJUNG, L. *System identification toolbox: User's guide*. [S.l.]: Citeseer, 2020. Citado na página 54.
- MACKAY, L. *Steps towards the universal direct current distribution system*. Tese (Tese de Doutorado) — Delft University of Technology, 2018. Citado na página 16.
- MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Power system transients: parameter determination*. [S.l.]: CRC press, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 45.
- MAYR, O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens. *Archiv für Elektrotechnik*, Springer Science and Business Media LLC, v. 37, n. 12, p. 588–608, dec 1943. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.
- MOREL, R. Cahier technique no. 154 lv circuit-breaker breaking techniques. *Schneider Electric*, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 23, 33 e 71.
- OHTAKA, T.; KERTÉSZ, V.; SMEETS, R. P. P. Novel black-box arc model validated by high-voltage circuit breaker testing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 4, p. 1835–1844, 2017. Citado na página 91.
- PARIZAD, A. et al. Optimization of Arc Models Parameters Using Genetic Algorithm. *2009 International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, (EPECS)*, IEEE, p. 1–7, 2009. Citado na página 54.
- PARK, K.-H. et al. Assessment of various kinds of AC black-box arc models for DC circuit breaker. *ICEPE-ST 2017 - 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology*, v. 2017-Decem, p. 465–469, 2017. Citado na página 65.
- PARK, K.-H. et al. Parameter identification of dc black-box arc model using non-linear least squares. *The Journal of Engineering*, 2019, n. 16, p. 2202–2206, 2019. Citado na página 65.
- PICOT, P. Cahier technique no. 198. Vacuum switching. 2000. Citado na página 35.
- PORTELA, C. Study of problems related to switching of relatively small currents. CIGRE, 1980. Citado na página 39.
- PORTELA, C. M. et al. Modeling of arc extinction in air insulation. *IEEE transactions on electrical insulation*, v. 27, n. 3, p. 457–563, 1992. Citado na página 40.
- RASHTCHI, V.; LOTFI, A.; MOUSAVI, A. Identification of KEMA arc model parameters in high voltage circuit breaker by using of genetic algorithm. *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, p. 1515–1517, 2008. Citado na página 54.
- RIEDER, W.; URBANEK, J. New aspects of current-zero research on circuit-breaker reignition: A theory of thermal non-equilibrium arc conditions. *Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension*, p. 14, 1966. Citado na página 39.
- RIJANTO, H. Experimentelle bestimmung der parameter der verallgemeinerten lichtbogengleichung zur berechnung von schaltvorgängen. *ETZ-A*, v. 95, p. 221–223, 1974. Citado na página 47.

- RODRÍGUEZ-MEDINA, B. *Parameters Extraction Tool for High Pressure Gas Arc Models in High Voltage Circuit Breaker Simulations*. Tese (Tese de Mestrado) — University of Puerto Rico, 2003. Citado na página 68.
- RODRÍGUEZ-MEDINA, B.; ORAMA-EXCLUSA, L.; VÉLEZ-REYES, M. Arc model parameter extraction techniques using nonlinear least squares. *Proceedings of the 35th North American Power Symposium*, 2003. Citado 6 vezes nas páginas 46, 48, 50, 52, 53 e 54.
- ROJEK, A. Switching-off time of electromagnetic blow-out high-speed dc circuit breaker. *Railway Reports*, v. 169, p. 53–60, 2015. Citado 8 vezes nas páginas 58, 59, 60, 61, 75, 78, 81 e 84.
- ROJEK, A.; SIDOROWICZ, M. Researches and tests of high-speed circuit breakers for rolling stock and substations in 3 kv dc traction power system. *Problemy Kolejnictwa*, 2013. Citado na página 16.
- ROJEK, A.; SKRZYNIARZ, M. Contact arc time—important parameter of dc high-speed circuit-breakers. In: EDP SCIENCES. *MATEC Web of Conferences*. [S.l.], 2019. v. 294, p. 05002. Citado 3 vezes nas páginas 63, 64 e 72.
- RUPPE, R. *Experimentelle und theoretische Untersuchungen am axial beströmten Wechselstromlichtbogen vor dem Stromnulldurchgang*. Tese (Doutorado) — Technical University Ilmenau, 1980. Citado na página 48.
- SCHAVEMAKER, P.; SLUIS, L. V. D. The arc model blockset. In: *Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS, Crete*. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 74.
- SCHLABBACH, J. *Short-circuit currents*. [S.l.]: Iet, 2005. v. 51. Citado na página 20.
- SCHWALB, E. et al. Investigation of unit testing and full pole testing of a single pressure type double nozzle SF6 circuit-breaker under short-line fault. 1978. Citado na página 39.
- SCHWARZ, J. Dynamisches verhalten eines gasbeblasenen, turbulenzbestimmten schaltlichtbogens. *ETZ-A*, v. 92, p. 389–391, 1971. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 43.
- SKARE, J.; TOMISA, T.; MESIC, M. Dynamics analysis of 220 v dc auxiliary system in power plant using different mathematical models. In: IEEE. *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. [S.l.], 2009. p. 381–385. Citado na página 23.
- SLADE, P. G. *Electrical contacts: principles and applications*. [S.l.]: CRC press, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- SLUIS, L. V. D.; RUTGERS, W. R.; KOREMAN, C. G. A physical ARC model for the simulation of current zero behavior of high-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 2, p. 1016–1022, 1992. Citado na página 40.
- SLUIS, L. Van der. *Transients in power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2001. Citado na página 24.

- SMEETS, R. P. P.; KERTÉSZ, V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a validated arc model. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, v. 147, n. 2, p. 121–125, 2000. Citado na página 40.
- The MathWorks Inc. Simulink User's Guide R2020a. 2020. Citado na página 110.
- THÉOLEYRE, S. Cahier technique no. 193: Mv breaking techniques. *sl: Schneider Electric*, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 33.
- THIEL, H. G. Theoretical investigation of the different arc quenching phenomena in SF6 and air blast circuit breakers. 1979. Citado na página 43.
- URBANEK, J. Zur Berechnung des Schaltverhaltens von Leistungsschaltern eine erweiterte Meyr-Gleichung. *ETZ-A*, v. 93, n. 7, p. 381–385, 1972. Citado na página 39.
- ZANETTA JR., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. [S.l.]: EdUSP, 2003. Citado na página 42.
- ZHANG, G. et al. Parameter Estimation of Black Box Arc Model based on Heuristic Optimization Algorithms. *Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*, p. 66–70, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 54, 55, 64 e 66.

Apêndices

APÊNDICE A – Código de Mayr - AG

A seguir será demonstrada a implementação do código em *python* do algoritmo genético para o modelo de Mayr. Os primeiros passos consistem na inicialização dos parâmetros do programa (Figura A.1) e na definição da função de integração (Figura A.2).

Figura A.1 – Inicialização do programa

```
# PROGRAMA DE AG PARA O MODELO DE ARCO DE MAYR

import os
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from numba import jit
from scipy.interpolate import interp1d
plt.style.use('seaborn-darkgrid')
plt.rcParams.update({'font.size': 20})
```

Fonte: Autor

Figura A.2 – Função de integração

```
# Metodo de Runge-Kutta
@jit(nopython=True)
def qcCalc(t2, v2, i2, Tm, Po):

    g = np.zeros(len(t2))
    g[0] = i2[0,0]/v2[0,0]

    error = 0
    for k in range(1,len(t2)):

        dgd1 = (g[k-1]/Tm)*((v2[k-1,0]*i2[k-1,0])/(Po)-1)
        h = t2[k,0]-t2[k-1,0]

        k1 = h*dgd1
        y1 = abs(g[k-1])+(k1/2)
        dgd11 = (y1/Tm)*((v2[k-1,0]*i2[k-1,0])/(Po)-1)
        k2 = h*dgd11
        y2 = (g[k-1])+(k2/2);
        dgd12 = (y2/Tm)*((v2[k-1,0]*i2[k-1,0])/(Po)-1)
        k3 = h*dgd12
        y3 = (g[k-1])+(k3);
        dgd13 = (y3/Tm)*((v2[k-1,0]*i2[k-1,0])/(Po)-1)
        k4 = h*dgd13

        g[k] = (g[k-1])+((1/6)*(k1+(2*k2)+ (2*k3)+k4))

        gReal = i2[k,0] / v2[k,0]
        error += ( ( g[k] - gReal )**2 )**0.5

    return g, error/len(t2)
```

Fonte: Autor

Em seguida é feita a definição da classe do modelo de Mayr, que contém os métodos de inicialização dos parâmetros, mutação e cálculo da função custo para um indivíduo da população (Figura A.3).

Figura A.3 – Definição da classe do modelo de Mayr

```
class mayrModel():
    def __init__(self):

        self.Tm = 1e-4*np.random.rand()
        self.Po = 50e6*np.random.rand()

        self.fitness = -1e20
        self.score = 0

    def Mutation(self,pm):
        dtm = 1e-4
        dpo = 1e6

        if (np.random.rand()<pm):
            self.Tm += dtm*np.random.randn()
        if (np.random.rand()<pm):
            self.Po += dpo*np.random.randn()

    def Fitness(self):

        Tm = self.Tm
        Po = self.Po

        gMayr,error = qcCalc(t, v, i, self.Tm, self.Po)

        self.fitness = -error
```

Fonte: Autor

A função de criação da população é mostrada na Figura A.4, que agrega indivíduos da classe do modelo de Mayr de acordo com o tamanho da população desejada.

Figura A.4 – Função de criação da população

```
def createPopulation(populationSize):

    population = []

    for individual in range(0,populationSize):

        population.append(mayrModel())

    return population
```

Fonte: Autor

Na sequência são mostradas as funções de cruzamento e mutação (Figura A.5), onde dois progenitores geram dois descendentes por meio de um cruzamento aritmético, além da função de seleção (Figura A.6), realizada por meio de um torneio adaptado para selecionar os melhores indivíduos.

Figura A.5 – Função de cruzamento e mutação

```
def crossover_mutation(progenitors, pc=0.9, pm = 0.05):
    import copy
    descendants = []

    while (len(descendants) < populationSize):

        # Crossover
        if (np.random.rand() <= pc):
            ind1 = 0
            ind2 = 0

            while (ind1 == ind2):
                ind1, ind2 = np.random.randint(0, populationSize, size=2)

            progenitor1 = progenitors[ind1]
            progenitor2 = progenitors[ind2]

            descendant1 = mayrModel()
            descendant2 = mayrModel()

            a = np.random.rand()

            descendant1.Tm = a * progenitor1.Tm + (1 - a) * progenitor2.Tm
            descendant2.Tm = (1 - a) * progenitor1.Tm + a * progenitor2.Tm

            descendant1.Po = a * progenitor1.Po + (1 - a) * progenitor2.Po
            descendant2.Po = (1 - a) * progenitor1.Po + a * progenitor2.Po

            # Mutation
            descendant1.Mutation(pm)
            descendant2.Mutation(pm)

            # Addition of new individual
            descendants.append(descendant1)
            descendants.append(descendant2)

    return descendants
```

Fonte: Autor

Figura A.6 – Função de seleção

```
def naturalSelection(totalPopulation, groupPercentage = 0.4):
    from operator import attrgetter

    # Tournament
    for participant in totalPopulation:
        participant.score = 0

        contrincants = np.random.randint(0, len(totalPopulation), size = int(len(totalPopulation)*groupPercentage) )
        for contrincant in contrincants:
            if participant.fitness > totalPopulation[contrincant].fitness:
                participant.score += 1

    # Remove losers
    while(len(totalPopulation)>populationSize):
        minScoreIndex = totalPopulation.index(min(totalPopulation, key=attrgetter('score')))
        totalPopulation.pop(minScoreIndex)

    return totalPopulation
```

Fonte: Autor

Após a definição de todas as funções auxiliares, a função de solução do modelo é definida na Figura A.7. A Figura A.8 mostra a função de visualização das soluções calculadas pelo programa.

Figura A.7 – Função de solução do problema

```
def solveModel(populationSize, generations):

    from IPython.display import clear_output
    from operator import attrgetter

    # Initialize population
    progenitors = createPopulation(populationSize)

    # Optimization with AG
    fitness = []
    for generation in range(generations):

        randomProgenitors = createPopulation(int(populationSize*0.1))
        descendants = crossover_mutation(progenitors+randomProgenitors,pm=0.25)
        totalPopulation = progenitors+randomProgenitors+descendants

        for individual in totalPopulation:
            individual.Fitness()

        progenitors = naturalSelection(totalPopulation,groupPercentage = 0.2)

        minCostIndex = progenitors.index(max(progenitors, key=attrgetter('fitness')))
        fitness.append(-progenitors[minCostIndex].fitness)
        clear_output()
        print("Generation " + str(generation) + " finished")

        bestSolution = progenitors[minCostIndex]
        print(f'Error = {-progenitors[minCostIndex].fitness:.4f} %')

        gMayr,error = qcCalc(t, v, i, bestSolution.Tm, bestSolution.Po)

    return bestSolution
```

Fonte: Autor

Figura A.8 – Função de visualização das soluções

```
def view_solutions(solutions):
    for i in range(len(solutions)):
        print(f'\n Solution: {i} Tm = {solutions[i].Tm*1e3:.4f} ms, Po = {solutions[i].Po/1e6:.4f} MW, Error = {-solutions[i].fitness:.4f} %')
```

Fonte: Autor

Por fim, o programa principal é mostrado na Figura A.9, sendo utilizado neste exemplo um total de 10 repetições. Os resultados são apresentados na Figura A.10.

Figura A.9 – Programa principal

```
# INICIO DO PROGRAMA
%%time

from IPython.display import clear_output
from operator import attrgetter

iOriginal = pd.read_csv('current.txt')
vOriginal = pd.read_csv('voltage.txt')
tOriginal = pd.read_csv('time.txt')

i = np.array(iOriginal)
v = np.array(vOriginal)
t = np.array(tOriginal)

gReal = i/v

listOfSolutions = []
populationSize = 50
generations = 100
repetitions = 10

for count in range(repetitions):

    listOfSolutions.append(solveModel(populationSize, generations))

print("Optimization finished")

print("\n -- List of Solutions -- \n")
view_solutions(listOfSolutions)

minCostIndex = listOfSolutions.index(max(listOfSolutions, key=attrgetter('fitness')))
bestSolution = listOfSolutions[minCostIndex]

print("\n -- Best Solution -- \n")

gMayr,error = qcCalc(t, v, i, listOfSolutions[minCostIndex].Tm, listOfSolutions[minCostIndex].Po)

print(f'\n Best Solution: Tm = {bestSolution.Tm*1e3:.4f} ms, Po = {bestSolution.Po/1e6:.4f} MW, Error = {-bestSolution.fitness:.4f} %')
plt.figure(figsize = (10,5))
plt.plot(t*1e3,gMayr)
plt.plot(t*1e3,gReal)

plt.show()
plt.close
```

Fonte: Autor

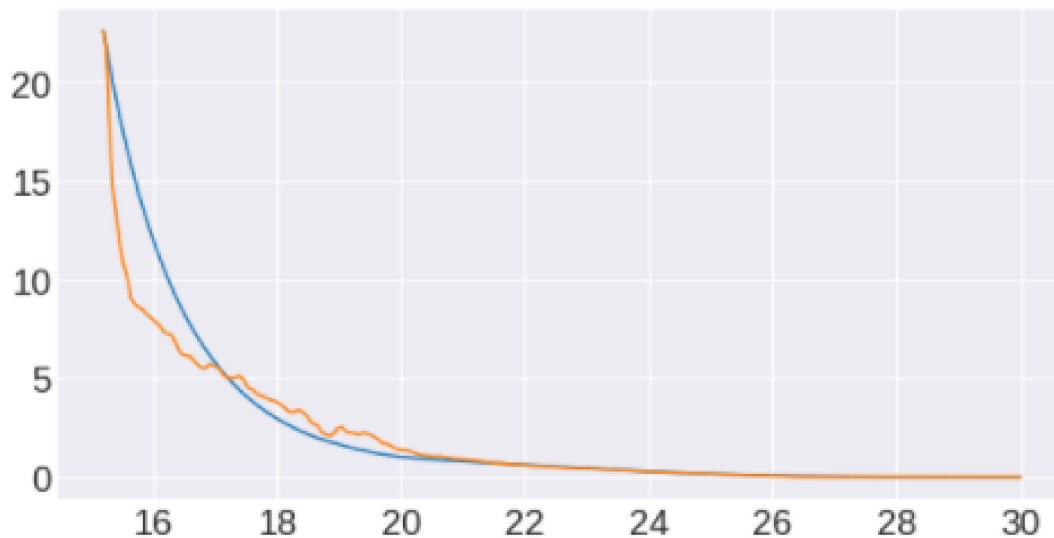
Figura A.10 – Resultados do programa para 10 repetições

```
-- List of Solutions --

Solution: 0 Tm = 1.2267 ms, Po = 24.5691 MW, Error = 0.5696 %
Solution: 1 Tm = 1.1474 ms, Po = 21.8241 MW, Error = 0.5650 %
Solution: 2 Tm = 1.2778 ms, Po = 26.0799 MW, Error = 0.5729 %
Solution: 3 Tm = 1.1481 ms, Po = 21.8481 MW, Error = 0.5650 %
Solution: 4 Tm = 1.1475 ms, Po = 21.8314 MW, Error = 0.5650 %
Solution: 5 Tm = 1.1413 ms, Po = 21.7415 MW, Error = 0.5652 %
Solution: 6 Tm = 1.2343 ms, Po = 24.4191 MW, Error = 0.5690 %
Solution: 7 Tm = 1.1475 ms, Po = 21.8303 MW, Error = 0.5650 %
Solution: 8 Tm = 1.1500 ms, Po = 21.9006 MW, Error = 0.5650 %
Solution: 9 Tm = 1.2638 ms, Po = 25.3093 MW, Error = 0.5716 %

-- Best Solution --
```

```
Best Solution: Tm = 1.1475 ms, Po = 21.8314 MW, Error = 0.5650 %
```



```
CPU times: user 2min 45s, sys: 1.65 s, total: 2min 47s
Wall time: 2min 47s
```

Fonte: Autor

APÊNDICE B – Modelos de Arco ATP e PSCAD

A seguir será demonstrada a implementação do modelo de Mayr no ATP, além de uma outra biblioteca disponível para o PSCAD com alguns modelos de arco.

B.0.1 Modelo de arco no ATP

Para implementar os modelos de arco elétrico em programas do tipo EMT, primeiro é preciso representar as equações na forma discreta. Para isso, podem ser empregados diferentes métodos de integração. Por simplicidade, a demonstração a seguir será feita utilizando o método de Euler.

Reescrevendo a equação do modelo de Mayr (2.26) na forma de diferenças finitas:

$$\frac{g_{m2} - g_{m1}}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i^2}{P_0} - g_{m1} \right) \quad (\text{B.1})$$

Desenvolvendo a equação (B.1):

$$g_{m2} = g_{m1} + \frac{\Delta t}{\tau_m} \left(\frac{i^2}{P_0} - g_{m1} \right) \quad (\text{B.2})$$

Agrupando os termos em g_{m1} e substituindo a notação, a equação (B.2) também pode ser escrita da seguinte forma:

$$g_{m(n+1)} = \frac{\Delta t}{\tau_m} \frac{i_{(n)}^2}{P_0} + g_{m(n)} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_m} \right) \quad (\text{B.3})$$

Este mesmo procedimento pode ser replicado para os modelos de arco de Cassie, Habedank e Schwarz, conforme os resultados mostrados nas equações (B.4) (B.5) e (B.6):

Para o modelo de Cassie:

$$g_{c(n+1)} = \frac{\Delta t}{\tau_c} \frac{u_{(n)} \cdot i_{(n)}}{u_0^2} + g_{c(n)} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_c} \right) \quad (\text{B.4})$$

Para o modelo de Habedank:

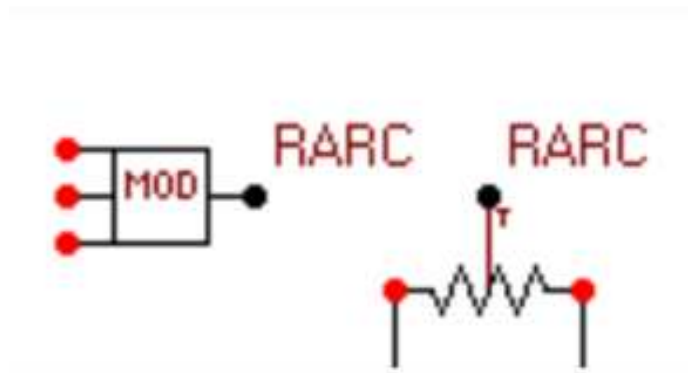
$$g_{hd(n+1)} = \frac{g_{c(n+1)}g_{m(n+1)}}{g_{c(n+1)} + g_{m(n+1)}} \quad (\text{B.5})$$

Para o modelo de Schwarz:

$$g_{sc(n+1)} = \frac{\Delta t}{\tau_0 g_{sc(n)}^\alpha} \frac{i_{(n)}^2}{P_0 g_{sc(n)}^\beta} + g_{sc(n)} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_0 g_{sc(n)}^\alpha} \right) \quad (\text{B.6})$$

Em seguida os valores de condutância calculados pela equações (B.3) são implementados em um componente na linguagem MODELS (Apêndice C) e enviados a uma resistência controlada (TYPE 91), disponível no software ATP, conforme ilustrado na Figura B.1.

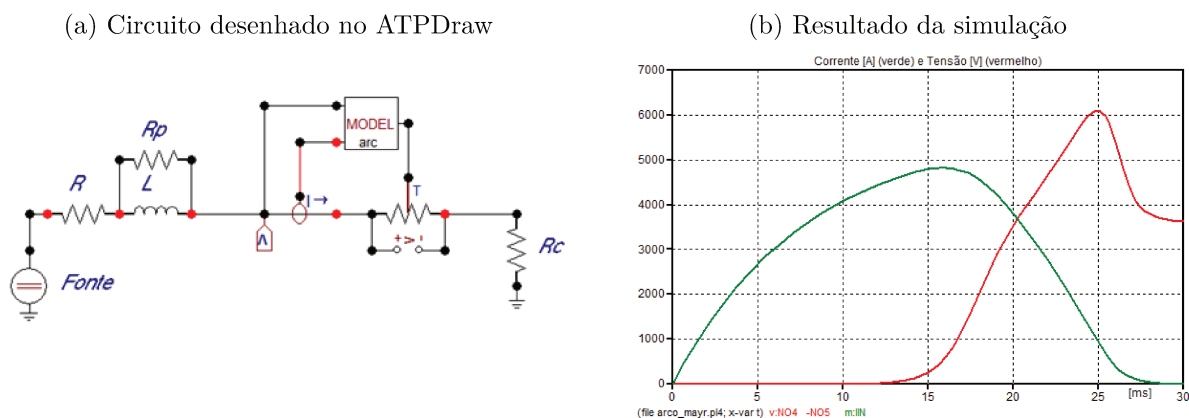
Figura B.1 – Modelo resistência variável ATP (TYPE-91)



Fonte: Autor

O circuito simulado no ATP é mostrado na Figura B.2a. Por simplicidade, o circuito de retificação foi substituído por uma fonte de tensão constante de valor igual ao valor médio obtido na saída do retificador. Desta forma, é possível comparar os resultados das simulações com os obtidos anteriormente, incluindo os do PSCAD, focando na implementação do modelo de arco elétrico. O resultado da simulação é mostrado na Figura B.2b.

Figura B.2 – Simulação do modelo de Mayr no ATP

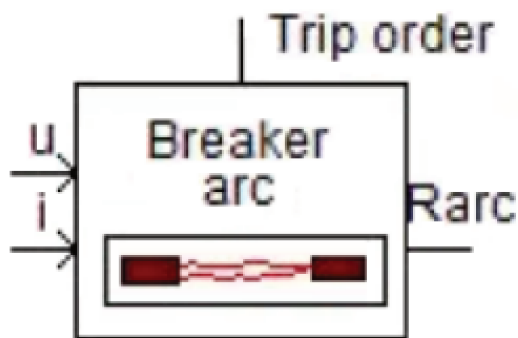


Fonte: Autor

B.0.2 Modelo de arco no PSCAD

O PSCAD também possui um modelo de disjuntor com interrupção por arco elétrico chamado "*Breaker Arc*" (JIANG, 2013), mostrado na Figura B.3, onde é possível selecionar o modelo de arco a ser utilizado, especificamente os modelos de arco de Cassie, Mayr e Schavemaker.

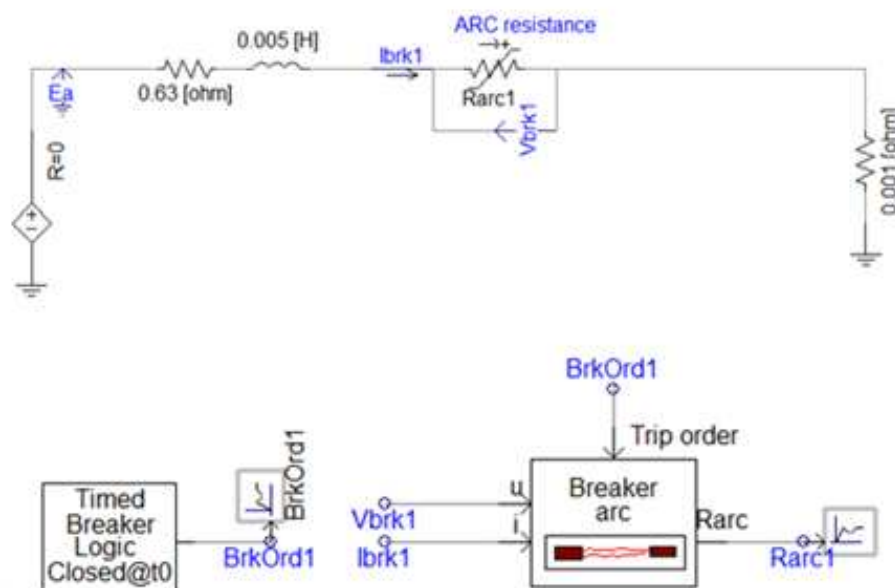
Figura B.3 – Modelo resistência disjuntor com arco (PSCAD)



Fonte: Adaptado de Jiang (2013)

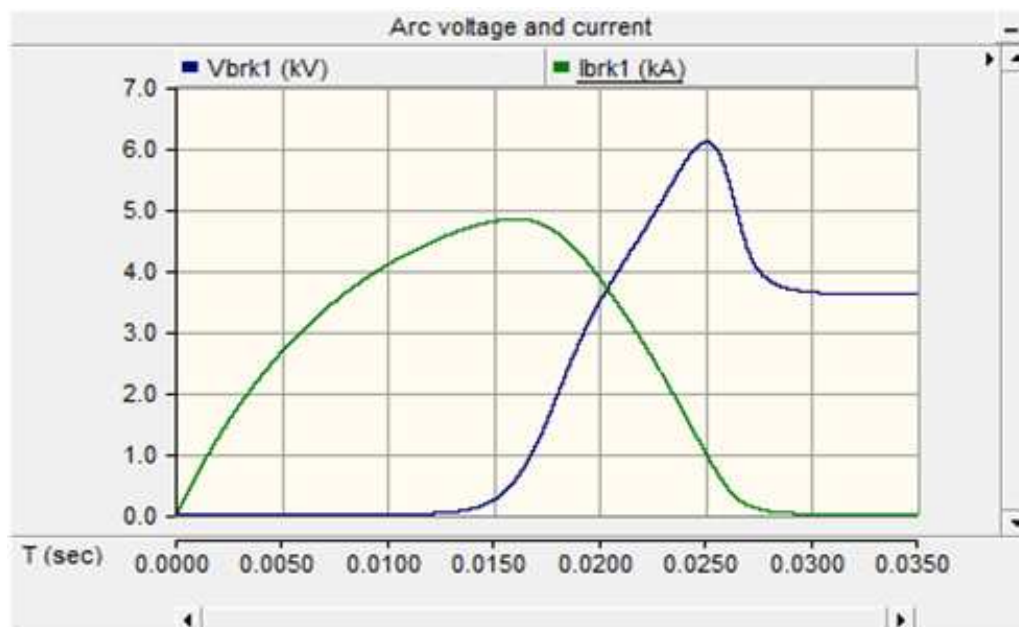
O circuito montado no PSCAD é mostrado na Figura B.4, utilizando os mesmos valores de parâmetros do circuito anterior com o modelo de Mayr. O resultado da simulação é mostrado na Figura B.5.

Figura B.4 – Circuito simulado no PSCAD



Fonte: Autor

Figura B.5 – Resultado da simulação do modelo de Mayr no PSCAD

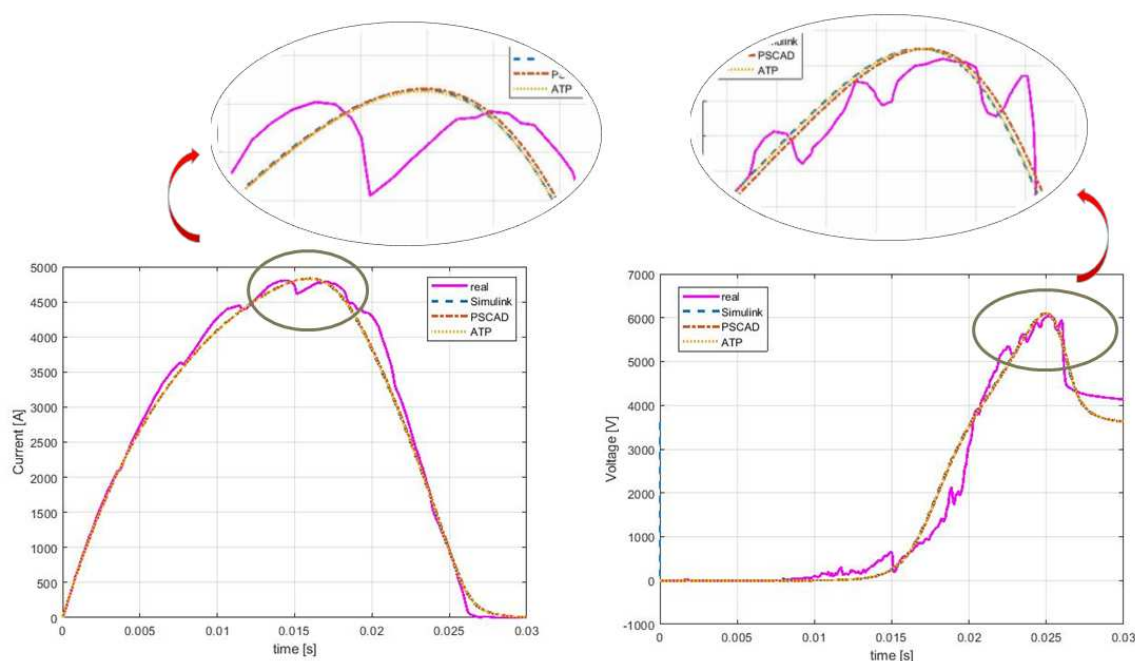


Fonte: Autor

B.0.3 Análise das simulações

Os circuitos simulados anteriormente foram comparados com o experimento de referência e com os resultados obtidos pelo Simulink, considerando a fonte de tensão como uma fonte constante de 3,6 kV. Os gráficos da corrente e tensão de arco são mostrados na Figura B.6. Como é possível notar, as formas de onda são muito próximas, salvo por pequenas diferenças perceptíveis somente na parte ampliada. Estas diferenças ocorrem porque o método de integração utilizado no Simulink foi o *ode23tb*, que é uma implementação da fórmula implícita de Runge-Kutta de dois estágios (The MathWorks Inc, 2020), enquanto que o ATP e PSCAD se baseiam no método trapezoidal, proposto por Dommel (1969). Além disso, os modelos de arco possuem implementações distintas, visto que o modelo de Mayr desenvolvido para o ATP neste trabalho foi feito utilizando o método de Euler, enquanto os modelos do Simulink e do PSCAD são oriundos de uma biblioteca externa.

Figura B.6 – Simulações no Simulink, ATP e PSCAD



Fonte: Autor

APÊNDICE C – Código de Mayr - MODELS

O código mostrado a seguir representa um exemplo de programação em MODELS para o modelo de Mayr.

MODEL ARC

```

-----
- - - - Modelo de Arco - - - -
-----
COMMENT
Modelo de arco eletrico de Mayr
Inputs: Tensao de entrada e Corrente de entrada
Output: Resistencia do arco eletrico
ENDCOMMENT
--
--
INPUT
VIN[1]
IIN[1]
--
--
OUTPUT
R_ARC
--
--
DATA
tau{dflt: 1.10E-3} - - Constante de tempo do arco do modelo Mayr;
P0{dflt: 20.00E6} - - Constante de resfriamento do modelo Mayr;
--
--
VAR
Gm    - - Condutância calculada pelo modelo Schwarz;
Rm    - - Resistência calculada pelo modelo Schwarz;
R_ARC - - Resistência do arco elétrico;
--

```

```
--  
INIT  
Gm:=1.0E4  
Rm:=1/Gm  
R_ARC:=Rm  
ENDINIT  
  
--  
--  
EXEC  
IF (t<0.00802) THEN  
R_ARC:= 10E-6  
ELSE  
Gm:=(timestep/tau)*((IIN[1]**2)/(P0)) + prevval(Gm)*(1-timestep/tau)  
Rm:= 1/(Gm)  
R_ARC:= Rm  
ENDIF  
ENDEXEC  
  
--  
--  
ENDMODEL  
RECORD  
ARC.R_ARC AS R_ARC  
ARC.VIN[1] AS VIN  
ARC.IIN[1] AS IIN
```