

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Sensibilidade de Equipamentos Industriais  
frente a Afundamentos Momentâneos de  
Tensão

**Fernando Luis Leal Jung**

Itajubá, 12 de Março de 2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Fernando Luis Leal Jung**

**Sensibilidade de Equipamentos Industriais  
frente a Afundamentos Momentâneos de  
Tensão**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**

**Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho  
Coorientador: Prof. Dr. Frederico Oliveira Passos**

**12 de Março de 2021  
Itajubá**

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Sandra e José Antônio, pelo apoio, incentivo e encorajamento a buscar conhecimento.

Ao Estácio, pela companhia, inspiração e todo apoio nos meus dias em Itajubá.

Ao Lúcio, por caminhar comigo desde o início do mestrado, nessa jornada aprendendo juntos, onde pude contar com seu apoio técnico em diversas etapas.

Aos professores Frederico Oliveira Passos e José Maria de Carvalho Filho pela confiança depositada em mim, pelo apoio e orientação essenciais para este trabalho.

Aos amigos que conheci no QmaP, Ana Luísa, Elisa, Keli e Nicolás, pela ajuda mútua incondicional, pelos momentos compartilhados em toda essa trajetória.

A Keli, Tiago Lino e Tiago Fedrigo pela ajuda relacionada a operação do RTDS ao utilizar o *hardware-in-the-loop*.

Aos meus amigos de longa data, que mesmo apesar da distância e conversas por vezes esporádicas, por sempre me apoiar e incentivar, torcendo por mim de alguma forma.

Aos demais professores e colegas do QmaP pela interação e cuidado, em especial a Eliara, pelo suporte prestado.

A CAPES, a UNIFEI, ao QmaP/GQEE, parcerias e agências de fomento, pelo apoio financeiro e estrutural.

*Dedico este trabalho a Sandra e Estácio, por  
toda inspiração e encorajamento.*

# Resumo

Afundamentos Momentâneos de Tensão são variações na tensão eficaz que podem causar o mau funcionamento de equipamentos elétricos. Caracterizados principalmente por sua magnitude e duração, tais eventos apresentam diversas outras características que podem influenciar no comportamento dos equipamentos elétricos. A determinação da curva de sensibilidade a afundamentos de tensão varia de acordo com o tipo de equipamento, sendo um fator importante na análise de parada de processos produtivos em sistemas industriais. Dos métodos de caracterização de curvas disponíveis na literatura técnica, utiliza-se neste trabalho o método da Esquerda para Direita proposto pela IEEE 1668-2017, de forma automatizada em malha fechada no RTDS. Os componentes testados são os mais utilizados nas instalações industriais em baixa tensão (até 1000V): contadores c.a. e c.c., fontes em corrente contínua e CLP. Os equipamentos são testados individualmente, e também em conjunto, simulando uma bancada industrial. As curvas de sensibilidade são levantadas realizando-se repetições de mesmo tipo de evento, de forma a investigar a ocorrência de possível zona de incerteza. Os resultados são analisados e são feitas considerações sobre os procedimentos adotados, bem como sobre a sensibilidade dos equipamentos.

**Palavras-chaves:** Afundamentos Momentâneos de Tensão. Sensibilidade de Equipamentos. Testes de levantamento de curvas de suportabilidade. Malha fechada.

# Abstract

Voltage sags are deviations in the rms voltage that may lead to electrical equipment malfunction. Characterized mainly by its magnitude and duration, these events display many other characteristics that may affect electrical equipment behaviour. Equipment sensitivity curve characterization varies accordingly to equipment type, and is a main factor for analysing industrial process interruption. From the curve characterization methods available in literature, for this work, it is used the Left-Right method proposed on IEEE 1668-2017, in an automated form, using hardware-in-the-loop capability of RTDS. The devices tested are the most used in industrial plants in low voltage (less than 1000V): a.c. and c.c. electromagnetic contactor, switched-mode power supplies and PLC. The equipment are tested individually, but also as a group, simulating an industrial workbench. The sensitivity curves are obtained by repeating the same event, in order to evaluate the occurrence of a fuzzy zone. The results are analyzed and some considerations are raised about the procedure adopted and equipment sensitivity as well.

**Key-words:** Voltage sags. Equipment sensitivity. Testing of equipment for voltage sag curves. Hardware-in-the-loop.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Exemplo de Afundamento Momentâneo de Tensão de 3 ciclos de duração na forma instantânea (vermelho) e eficaz (azul). . . . .	22
Figura 2.2 – Exemplo de segmentação de um AMT trifásico. . . . .	23
Figura 2.3 – Exemplo de comportamento da tensão devido a partida de motor. . . . .	25
Figura 2.4 – Exemplo de Afundamento de Tensão devido a energização de transformador. . . . .	26
Figura 2.5 – Exemplo de Afundamento de Tensão devido a falta no sistema (curto-circuito). . . . .	27
Figura 2.6 – Exemplo de Afundamento de Tensão devido a falta no sistema (curto-circuito) com evolução. . . . .	27
Figura 2.7 – Exemplo de AMT de 45% de magnitude e 6 ciclos de duração com ângulo de incidência em $90^\circ$ . . . . .	28
Figura 2.8 – Representação dos três principais tipos de AMT, apresentando as fórmulas, vetores e formas de onda respectivas. . . . .	29
Figura 3.1 – Exemplo de curva de sensibilidade genérica de formato retangular. . . . .	32
Figura 3.2 – Exemplo de curva de sensibilidade com sobreposição de eventos de afundamento. . . . .	32
Figura 3.3 – Curva ITI. . . . .	33
Figura 3.4 – Curva SEMI F47. . . . .	34
Figura 3.5 – Exemplo de curvas de sensibilidade de um contator para diferentes pontos de incidência do AMT. . . . .	35
Figura 3.6 – Exemplo de curvas de sensibilidade de diferentes modelos de contator para ponto de incidência em $0^\circ$ . . . . .	35
Figura 3.7 – Exemplo de curvas de sensibilidade de um CLP para diferentes pontos de incidência do AMT. . . . .	36
Figura 3.8 – Exemplo de curvas de sensibilidade de diferentes modelos de CLP. . . . .	37
Figura 3.9 – Exemplo de curvas de sensibilidade de diferentes modelos de CLP ao aumentar a capacitância do modelo P1. . . . .	37
Figura 3.10 – Exemplo de curvas de sensibilidade de um computador (alimentado por fonte chaveada) para 3 condições de falha diferentes. . . . .	38
Figura 3.11 – Reinício de processo bem sucedido após AMT de duração $t_{amt}$ . . . . .	39
Figura 3.12 – Aumento de custos de medidas de mitigação conforme a proximidade à concessionária. . . . .	41
Figura 3.13 – Métodos de mitigação de AMTs segundo Bollen. . . . .	42
Figura 4.1 – Fluxograma para o método <i>Top-Down</i> . . . . .	47
Figura 4.2 – Gráfico do método <i>Top-Down</i> . . . . .	48

Figura 4.3 – Gráfico do método <i>Box-In</i> . . . . .	48
Figura 4.4 – Gráfico do método <i>Left-Right</i> . . . . .	49
Figura 4.5 – Fluxograma para o método <i>Left-Right</i> . . . . .	50
Figura 4.6 – Aplicação do método da dicotomia na magnitude de 85%. . . . .	51
Figura 4.7 – Ocorrência de diferente resultado para mesmo afundamento de tensão aplicado (Z) de 45% de magnitude e 70ms de duração, havendo falha apenas para Onda 2. . . . .	52
Figura 4.8 – Gráfico de duas curvas, onde a área entre as duas curvas representa a região de incerteza. . . . .	53
Figura 4.9 – Fluxograma do método adaptado da caracterização Esquerda-Direita ( <i>Left-Right</i> ) com repetições. . . . .	54
Figura 4.10–Montagem da simulação no <i>Draft</i> do RSCAD. . . . .	55
Figura 4.11–Simulação rodando no <i>RunTime</i> do RSCAD. . . . .	56
Figura 4.12–Resposta vista no <i>RunTime</i> para falha de equipamento. . . . .	56
Figura 4.13–Diagrama de conexões genérico para bancada de testes, mostrando o equipamento sob testes. . . . .	57
Figura 4.14–Foto da bancada experimental com rack dos equipamentos testados e RTDS: 1 - contadores c.a.; 2 - fontes c.c.; 3 - contadores c.c.; 4 - CLP; 5 - relé auxiliar; 6 - RTDS. . . . .	58
Figura 5.1 – Diagrama de conexões utilizado para testes com contator em corrente alternada. . . . .	61
Figura 5.2 – Diagrama de conexões dos contatos. . . . .	61
Figura 5.3 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 0°. . . . .	62
Figura 5.4 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 45°. . . . .	63
Figura 5.5 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 90°. . . . .	63
Figura 5.6 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 135°. . . . .	64
Figura 5.7 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 0°. . . . .	64
Figura 5.8 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 45°. . . . .	65
Figura 5.9 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 90°. . . . .	65
Figura 5.10–Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 135°. . . . .	66

Figura 5.11–Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 0°.	66
Figura 5.12–Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 45°.	67
Figura 5.13–Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 90°.	67
Figura 5.14–Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 135°.	68
Figura 5.15–Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 0°.	68
Figura 5.16–Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 45°.	69
Figura 5.17–Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 90°.	69
Figura 5.18–Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 135°.	70
Figura 5.19–Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 0°.	70
Figura 5.20–Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 45°.	71
Figura 5.21–Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 90°.	71
Figura 5.22–Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 135°.	72
Figura 5.23–Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 0°.	72
Figura 5.24–Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 45°.	73
Figura 5.25–Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 90°.	73
Figura 5.26–Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 135°.	74
Figura 5.27–Curvas de sensibilidade obtidas para os contadores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 0°.	75
Figura 5.28–Curvas de sensibilidade obtidas para os contadores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 45°.	75
Figura 5.29–Curvas de sensibilidade obtidas para os contadores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 90°.	76

Figura 5.30–Curvas de sensibilidade obtidas para os contadores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 135°.	76
Figura 5.31–Diagrama de conexões utilizado para testes com contator em corrente contínua utilizando o RTDS.	78
Figura 5.32–Diagrama de conexões utilizado para testes com contator em corrente contínua utilizando a fonte California.	78
Figura 5.33–Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte A para 0 e 90°.	79
Figura 5.34–Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte B para 0 e 90°.	80
Figura 5.35–Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte C para 0 e 90°.	80
Figura 5.36–Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte C com resistências para carga nominal, para 0 e 90°.	81
Figura 5.37–Curvas de sensibilidade das fontes chaveadas testadas sobrepostas para comparação.	82
Figura 5.38–Gráfico da corrente de retorno para magnitude de afundamento em 30% e ângulo de incidência em 0° para a Fonte C.	83
Figura 5.39–Gráfico da corrente de retorno para magnitude de afundamento em 30% e ângulo de incidência em 90° para a Fonte C.	83
Figura 5.40–Diagrama de conexões utilizado para testes com CLP, utilizando-se relé auxiliar para comando.	84
Figura 5.41–Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP para ângulo de incidência do AMT na forma de onda em 0 e 90°, aplicado na alimentação do equipamento.	85
Figura 5.42–Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP para ângulo de incidência do AMT na forma de onda em 0°, aplicado no <i>input</i> .	85
Figura 5.43–Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP para ângulo de incidência do AMT na forma de onda em 90°, aplicado no <i>input</i> .	86
Figura 5.44–Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP agrupadas conforme os casos previamente apresentados.	87
Figura 5.45–Diagrama de conexões utilizado para testes com a combinação de vários equipamentos conectados simulando uma bancada industrial - contator CA, contator CC, fonte chaveada e CLP.	88
Figura 5.46–Curva de sensibilidade obtida para a bancada do conjunto de equipamentos, adotando-se o critério de falha para o primeiro equipamento que apresentar avaria. AMT aplicado em 0°.	88
Figura 5.47–Curvas de sensibilidade dos equipamentos sobrepostas para comparação.	89
Figura A.1–Destaque em blocos no <i>Draft</i> do RSCAD para melhor visualização da simulação.	94
Figura A.2–Subsistema para cálculo da distorção harmônica total (THD).	95
Figura A.3–Subsistema Lógica AMT (bloco 2).	96

Figura A.4–Subsistema Lógica AMT (bloco 2) ampliando-se a parte principal. . . .	97
Figura A.5–Subsistema Sinal AMT (bloco 2). . . . .	97

# Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Tabela IEC . . . . .	46
Tabela 4.2 – Comparação dos Métodos de caracterização . . . . .	51
Tabela 5.1 – Modelos de Contatores Testados . . . . .	62
Tabela 5.2 – Modelos de Fontes Chaveadas . . . . .	77

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACE	Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers' Association</i> (Associação de Fabricantes de Computadores e Equipamentos de Negócios)
CLP	Controlador Lógico Programável
CVV	Conversor de Velocidade Variável
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i> (Restaurador Dinâmico de Tensão)
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade eletromagnética)
EST	Equipamento Sob Teste
GQEE	Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IHM	Interface Homem-máquina
ITI	<i>Information Technology Industry Council</i> (Conselho da Indústria de Tecnologia da Informação)
MIT	Motor de Indução Trifásico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QmaP	Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica

VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
RTDS	<i>Real-Time Digital Simulator</i> (Simulador Digital em Tempo Real)
SEMI	<i>Semiconductor Equipment Materials International</i> (Equipamentos e Materiais Semicondutores Internacional)
SO	Sistema Operacional
SVC	<i>Static var Compensator</i> (Compensador Estático de Reativos)
TI	Tecnologia da Informação
TIP	Tempo de Imunidade de Processo
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (Fonte de Alimentação Ininterrupta)

# Lista de símbolos

$f$	Frequência fundamental do sistema
$FI$	Fator de impacto
$rms$	Valor eficaz de uma medida ( <i>root mean square</i> )
$v_1$	Tensão fundamental medida
$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$	Magnitude das tensões eficazes de linha (na frequência fundamental)
$V_e$	Valor da magnitude de um evento de VTCD em %
$V_{res}$	Tensão residual de um evento de VTCD em Volts
$V_{ref}$	Tensão de referência de um evento de VTCD em Volts
$\Delta t_e$	Duração de um evento de VTCD

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	Considerações Iniciais	19
1.2	Relevância do Tema	19
1.3	Objetivos e Contribuição	20
1.4	Estrutura da Dissertação	20
<b>2</b>	<b>AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO</b>	<b>22</b>
2.1	Considerações Iniciais	22
2.2	Conceitos e Definições	22
2.3	Causas dos Afundamentos Momentâneos de Tensão	24
2.3.1	Partida de motores (ou grandes cargas)	24
2.3.2	Energização de transformadores	24
2.3.3	Faltas na rede elétrica	25
2.4	Outras Características dos Afundamentos de Tensão	28
2.4.1	Ponto de Incidência na forma de onda	28
2.4.2	Salto de Ângulo ( <i>Phase-Shift</i> )	28
2.4.3	Tipos de Afundamento	29
2.4.4	Evolução de falta e Critérios de Agregação	30
2.5	Considerações Finais	30
<b>3</b>	<b>EFEITOS DOS AMTS</b>	<b>31</b>
3.1	Considerações Iniciais	31
3.2	Sensibilidade dos Equipamentos	31
3.3	Curvas de Suportabilidade	31
3.3.1	CBEMA/ITI	33
3.3.2	SEMI F47	33
3.4	Efeitos e Impacto Financeiro dos AMTs	33
3.4.1	Efeitos nos Equipamentos Industriais	34
3.4.1.1	Contatores	34
3.4.1.2	Controladores Lógicos Programáveis	34
3.4.1.3	Fontes Chaveadas	38
3.4.2	Sensibilidade de Processo	39
3.4.3	Impacto nos Consumidores	39
3.5	Mitigação dos Afundamentos de Tensão	41
3.6	Considerações Finais	43

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA PARA TESTES EM EQUIPAMENTOS FRENTE A AMTS</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Teste de Compatibilidade x Teste de Suportabilidade</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>IEC 61000-4-11</b>	<b>45</b>
<b>4.4</b>	<b>IEEE 1668</b>	<b>46</b>
4.4.1	<i>Top-down e Box-in</i>	47
4.4.2	<i>Left-Right</i>	49
<b>4.5</b>	<b>Ponto-a-ponto</b>	<b>50</b>
<b>4.6</b>	<b>Dicotomia</b>	<b>51</b>
<b>4.7</b>	<b>Região de Incerteza</b>	<b>52</b>
<b>4.8</b>	<b>Metodologia Utilizada</b>	<b>53</b>
4.8.1	Simulador Digital em Tempo Real - RTDS	54
4.8.2	Bancada de Testes	57
<b>4.9</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>TESTES EM EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS FRENTE A AMTS</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>Contator CA</b>	<b>60</b>
5.2.1	Montagem da bancada	60
5.2.2	Resultados	62
5.2.3	Análises	74
<b>5.3</b>	<b>Contator CC e Fonte Chaveada</b>	<b>77</b>
5.3.1	Montagem da bancada	77
5.3.2	Resultados - Fonte alimentando somente Contator	79
5.3.3	Resultados - Fonte alimentando Contator e Resistor	81
5.3.4	Análises	81
<b>5.4</b>	<b>Controlador Lógico Programável</b>	<b>84</b>
5.4.1	Montagem da bancada	84
5.4.2	Resultados	84
5.4.3	Análises	86
<b>5.5</b>	<b>Bancada Industrial</b>	<b>87</b>
5.5.1	Montagem da bancada	87
5.5.2	Resultados	88
<b>5.6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>91</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões Gerais</b>	<b>91</b>
<b>6.2</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>92</b>
<b>6.3</b>	<b>Artigos Publicados</b>	<b>93</b>

<b>A</b>	<b>SIMULAÇÃO PARA TESTES DE AMT NO RSCAD . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>98</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

De diversas maneiras, a energia elétrica tem se tornado essencial na vida das pessoas, seja ao armazenar ou cozinhar alimentos, aquecer a água para o banho, iluminar as ruas e as casas, dentre várias outras formas que trazem conforto, comodidade e segurança ao cotidiano. Tudo isso só é possível graças ao contínuo desenvolvimento do sistema elétrico de potência, capaz de transportar a energia desde sua geração até os centros de consumo, percorrendo distâncias de consideráveis quilômetros.

Quando, no entanto, falta eletricidade ao consumidor, gera-se insatisfação ou até mesmo prejuízos financeiros. Cabe à concessionária de energia elétrica reverter a situação de forma mais rápida possível.

Apesar das interrupções de energia serem o problema mais notável por grande parte da população, vários outros distúrbios de qualidade da energia elétrica podem acontecer, tanto num piscar de olhos como durante dezenas de segundos ou minutos, passando despercebidos por alguns consumidores e ocasionando grande infortúnio para outros.

Nesse contexto, as variações de tensão de curta duração (VTCD), em especial os afundamentos momentâneos de tensão (AMT), mostram-se como um dos principais causadores de problemas para os consumidores. Tais ocorrências podem ser desde simples inconveniências, como a perda de configuração do relógio de um micro-ondas, ou reinicialização de computadores (que pode levar a perda de trabalho), até mesmo parada de produção industrial, acarretando em prejuízo financeiro.

Como foco deste trabalho, tem-se o levantamento de curvas de sensibilidade de alguns equipamentos industriais frente a afundamentos momentâneos de tensão, visto que uma eventual parada de um determinado processo produtivo irá depender da suportabilidade dos equipamentos instalados.

## 1.2 Relevância do Tema

Abordar a sensibilidade dos equipamentos elétricos tem sua principal motivação derivada dos estudos sobre o impacto dos AMTs em processos produtivos, ocasião em que são utilizadas as curvas de suportabilidade dos equipamentos. O conhecimento da curva de sensibilidade também pode ser utilizado tanto para subsidiar a análise e cálculo do indicador Fator de Impacto (FI) [1], como no estudo de alocação ótima de religadores considerando AMTs [2]. Destaca-se também o assunto em foco é abordado em diversos

trabalhos sobre Qualidade da Energia Elétrica (QEE), porém quase sempre como coadjuvante.

Como a solução óbvia de eliminar os AMTs é impraticável na vida real [3] devido às características do sistema elétrico, tornam-se necessárias medidas de mitigação, que são, em sua grande maioria, dispendiosas. O uso de baterias em *no-breaks* e *Uninterruptible Power Supply* (UPS), por exemplo, além do alto custo de implementação, carrega também a necessidade de manutenção (e troca) periódica. Outras soluções da Eletrônica de Potência, como restauradores de tensão dinâmicos (DVR), são inviáveis economicamente para a maioria dos consumidores.

Sendo assim, torna-se imprescindível conhecer a sensibilidade dos equipamentos, para que soluções de mitigação alternativas sejam possíveis de serem avaliadas nos estudos sobre QEE.

### 1.3 Objetivos e Contribuição

De forma geral, o objetivo principal desta dissertação é avaliar a sensibilidade de alguns equipamentos elétricos industriais, sendo que os objetivos específicos são:

- Analisar metodologias existentes na literatura para caracterização das curvas de sensibilidade;
- Montar bancada de testes em laboratório para levantamento das curvas de sensibilidade;
- Elaborar procedimento para utilização do RTDS para automatização dos testes;
- Testar equipamentos para analisar os critérios de falha (*trip*) de cada um;
- Obter as curvas de sensibilidade de alguns equipamentos de forma individual;
- Montar uma bancada geral, simulando uma planta industrial típica, para testar os equipamentos de forma conjunta.

Como contribuição do trabalho, destacam-se a automatização do processo de ensaio utilizando o RTDS e a validação da região de incerteza na curva de sensibilidade para determinados equipamentos.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

O texto deste trabalho de dissertação está organizado em seis capítulos, mais as referências bibliográficas e anexos.

No capítulo 1 é contextualizado o tema, apresentando sua relevância, assim como os principais objetivos e estrutura da dissertação.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos sobre os AMTs, sendo descritos os principais parâmetros para caracterização desses eventos e outros fatores para seu entendimento.

No capítulo 3 são abordados os efeitos dos AMTs para os consumidores em geral, sendo detalhado o impacto em alguns tipos de consumidores específicos. O conceito de curvas de sensibilidade é apresentado neste capítulo.

No capítulo 4 são discutidas as metodologias para a obtenção de curvas de sensibilidade de equipamentos, sendo apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, bem como a bancada laboratorial.

No capítulo 5 são apresentadas as curvas de sensibilidade dos equipamentos escolhidos para o estudo, como resultado dos testes laboratoriais - contadores em corrente alternada, contadores em corrente contínua, fontes chaveadas, e Controlador Lógico Programável (CLP) por serem componentes de grande uso no ambiente industrial.

No capítulo 6 tem-se as principais conclusões obtidas com a execução deste trabalho de dissertação. São feitas sugestões para trabalhos futuros e apresentados os artigos derivados do estudo.

## 2 Afundamentos Momentâneos de Tensão

### 2.1 Considerações Iniciais

No contexto da Qualidade da Energia Elétrica (QEE), os Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMT) são os eventos que mais causam problemas para os consumidores. Desta forma, busca-se neste capítulo apresentar os principais conceitos envolvidos, bem como as suas principais causas e características.

### 2.2 Conceitos e Definições

Afundamento Momentâneo de Tensão é um distúrbio de Qualidade da Energia Elétrica que se caracteriza pela queda do valor eficaz de tensão por um curto período de tempo, geralmente abaixo de 90% do valor nominal na magnitude e por até 3s de duração [4].

Na Figura 2.1 pode-se ver a representação gráfica de um exemplo de AMT, tanto no modo instantâneo, na forma de onda, como no valor eficaz (rms).

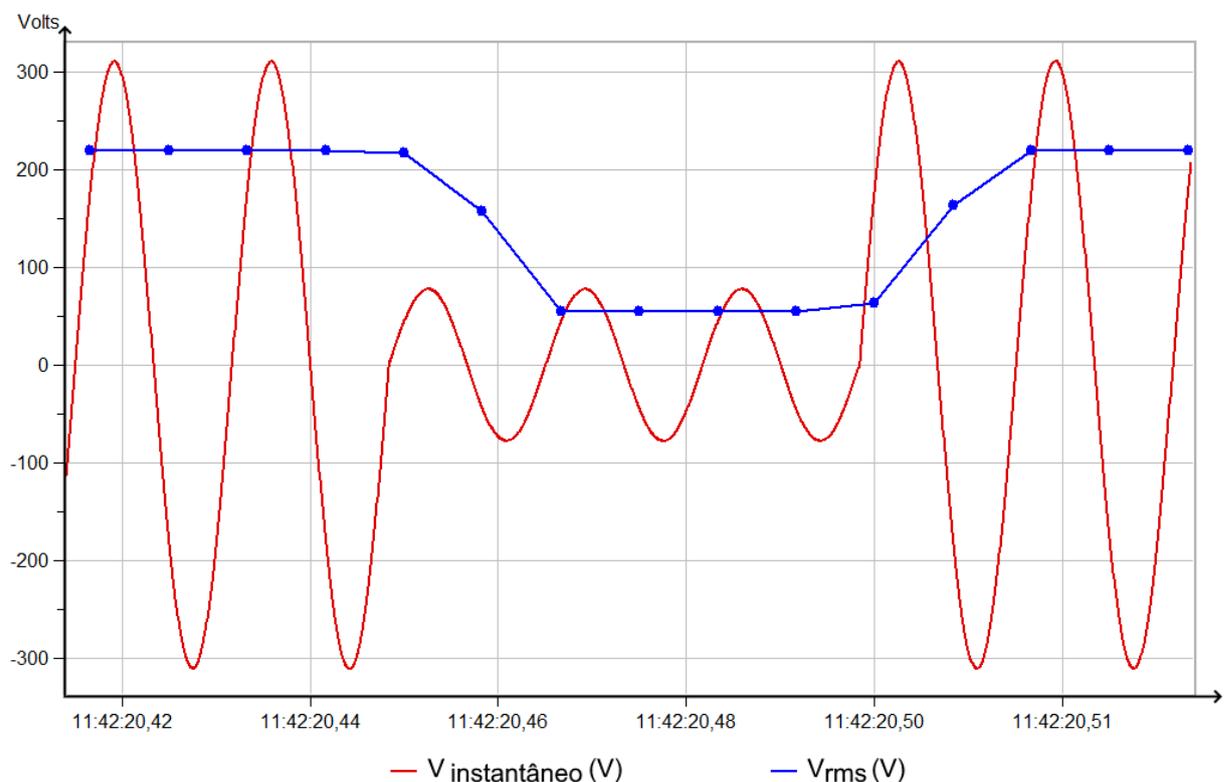


Figura 2.1 – Exemplo de Afundamento Momentâneo de Tensão de 3 ciclos de duração na forma instantânea (vermelho) e eficaz (azul).

Conforme o PRODIST [5], o AMT tem duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos, e magnitude superior ou igual a 10% e inferior a 90% da tensão nominal. Já para IEEE 1159 [6], o Afundamento Momentâneo de Tensão tem duração de 30 ciclos a 3 segundos, havendo no entanto mais uma divisão para Afundamento Instantâneo de Tensão para os casos entre meio ciclo e 30 ciclos.

Entende-se que o valor da magnitude utilizado para caracterização do AMT é o da tensão residual, ou seja, um afundamento de 60% de magnitude refere-se a 60% da tensão nominal. O entendimento de *voltage dips* da IEC, no entanto, já foi a queda de tensão, sendo um afundamento (*dip*) de 60% o equivalente a 40% da tensão residual. Felizmente, a IEC também passou a adotar a definição de *voltage sag* do IEEE, evitando-se confusão no tocante a nomenclatura.

Na Figura 2.2, adaptada de [7], pode-se visualizar como um AMT pode ser segmentado, de forma a melhor analisar o evento: pré-evento, transição, durante o evento, outro segmento de transição, e recuperação da tensão (pós-evento).

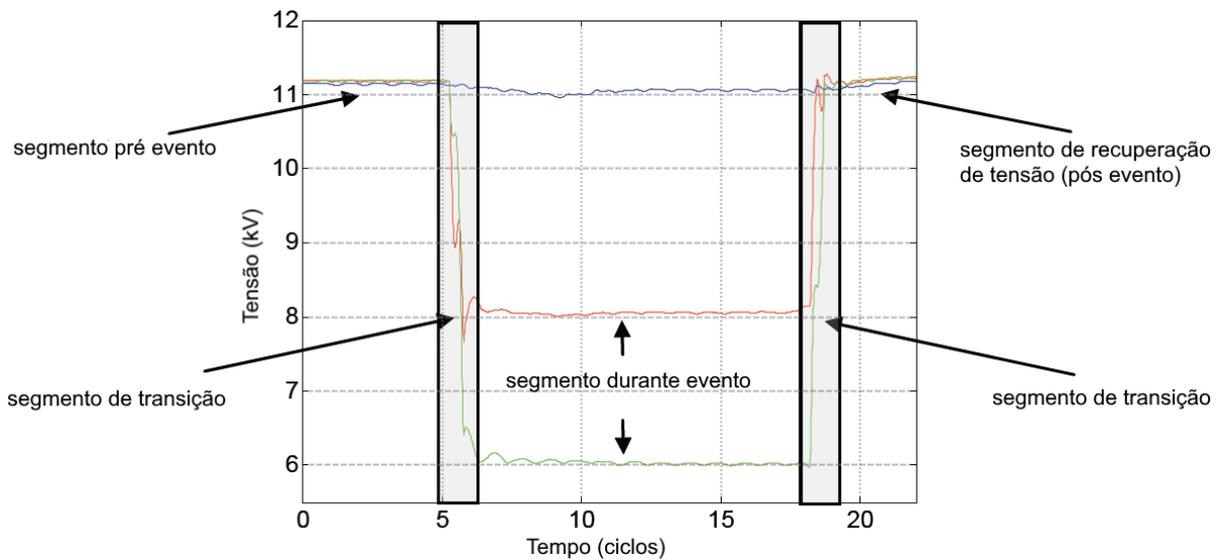


Figura 2.2 – Exemplo de segmentação de um AMT trifásico.

Os dois principais parâmetros utilizados para caracterizar o AMT de forma geral são magnitude e duração. Conforme o PRODIST [5], as expressões associadas são as Equações 2.1, para magnitude, e 2.2 para duração para eventos de VTCD.

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Onde  $V_e$  é a amplitude do evento (em %),  $V_{res}$  é a tensão residual (em Volts) e  $V_{ref}$  é a tensão de referência (em Volts).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (2.2)$$

Onde  $\Delta t_e$  é a duração do evento (em milissegundos),  $t_i$  é o instante inicial do evento, e  $t_f$  o instante final do evento de VTCD. Para AMTs, também é comum expressar a duração  $\Delta t_e$  em ciclos.

## 2.3 Causas dos Afundamentos Momentâneos de Tensão

### 2.3.1 Partida de motores (ou grandes cargas)

Quando ocorre a conexão direta de um motor de indução trifásico (MIT) a rede elétrica, a corrente de partida inicial do motor pode exceder o valor da corrente nominal de 5 a 6 vezes [3]. O tempo de aceleração depende da inércia da carga mecânica acionada [8].

Estando o motor instalado em um sistema elétrico radial fraco, a corrente de partida circulando na rede irá acarretar um afundamento de tensão não apenas nos terminais do motor, mas em todo seu alimentador [9]. Neste caso a duração poderá exceder 3 segundos e o evento passar a ser denominado de afundamento temporário de tensão (ATT).

A ocorrência de partida de grandes motores ou energização de grandes grupos (ou blocos) de cargas ocasionam afundamentos com apenas o primeiro segmento de transição, correspondente ao chaveamento da carga [7]. Ocorre uma súbita queda na tensão, que se recupera de forma lenta e gradual. A tensão pode não voltar ao mesmo valor pré evento, alcançando um novo valor de regime permanente.

Os afundamentos típicos devido a conexão de grandes motores trifásicos apresentam a mesma redução na magnitude de tensão das três fases, e a mesma inclinação na tensão de recuperação (afundamentos equilibrados) [7]. Um exemplo com essas características pode ser observado na Figura 2.3.

Vale salientar que afundamentos causados por partidas de motores podem ser evitáveis com as diversas técnicas de acionamento disponíveis na atualidade, como o uso de *soft-starters*, auto-transformadores e conversores de frequência [3] [9].

### 2.3.2 Energização de transformadores

Quando um transformador é energizado (ou reenergizado após uma interrupção), o equipamento pode drenar uma corrente de *inrush* do sistema da ordem de até 40 vezes de sua corrente de operação em carga nominal, devido ao núcleo de magnetização estar fora de fase com a tensão [10]. Essa corrente de magnetização não é senoidal, devido principalmente a influência do núcleo magnético, sendo os dois principais fatores o estado de saturação do núcleo de ferro magnético, e o efeito combinado da histerese e perdas no núcleo [8].

Assim, a energização de transformadores de potência pode também ocasionar afun-

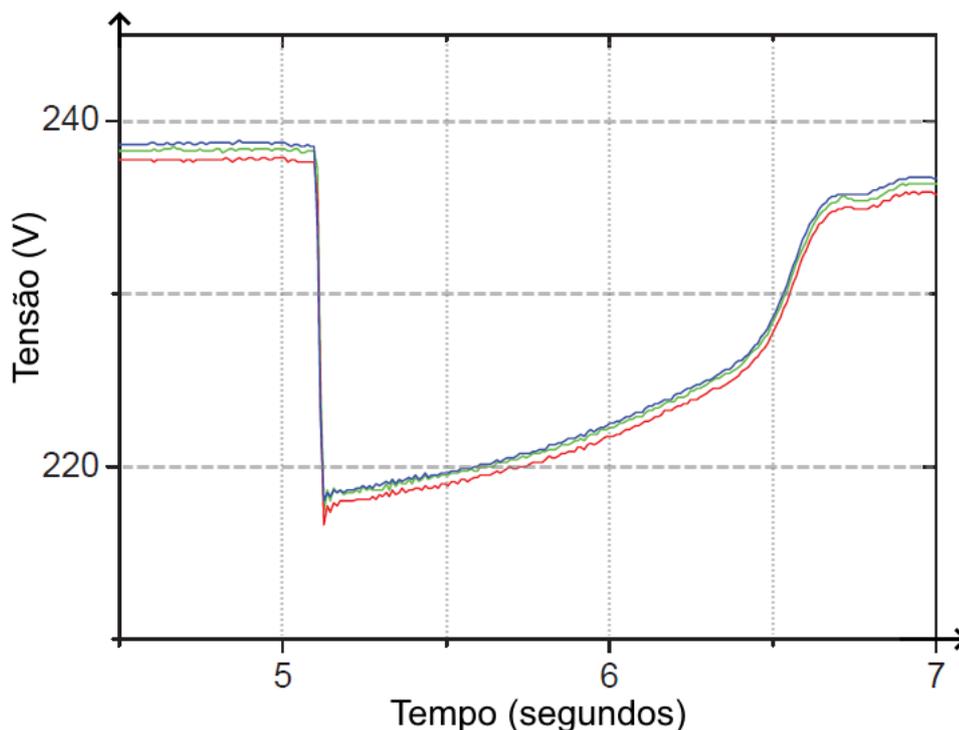


Figura 2.3 – Exemplo de comportamento da tensão devido a partida de motor.

damentos de tensão, a princípio parecidos com o do caso anterior, de partidas de motores ou grandes cargas, porém possuindo características diferentes no reestabelecimento de tensão.

Os afundamentos causados por transformadores possuem diferentes magnitudes de tensão nas fases afetadas (afundamentos desequilibrados). São também associados a um grande nível de distorção harmônica, onde ocorre aumento significativo dos harmônicos pares durante o afundamento [7]. Um exemplo desse caso pode ser visto na Figura 2.4.

Além de serem causadores de afundamentos de tensão, os motores e transformadores podem também influenciar os AMTs causados por curto-circuitos, prolongando o reestabelecimento da tensão [7].

### 2.3.3 Faltas na rede elétrica

A ocorrência de faltas na rede elétrica, ou seja, curtos-circuitos, são as causas mais recorrentes de AMTs no sistema de potência. Por terem característica aleatória, são mais difíceis de prever e serem evitados.

O tempo de eliminação da falta no sistema (fusível, disjuntor e relé de proteção) é o principal fator para determinar a duração do AMT, sendo normalmente, num sistema seletivo, eliminada pelo dispositivo mais próximo do curto-circuito [11]. O tempo de remoção de falta tem uma ampla faixa de variação, com tempos mais rápidos para curtos em linhas de transmissão (60-150ms), e consideravelmente mais lentos para circuitos de

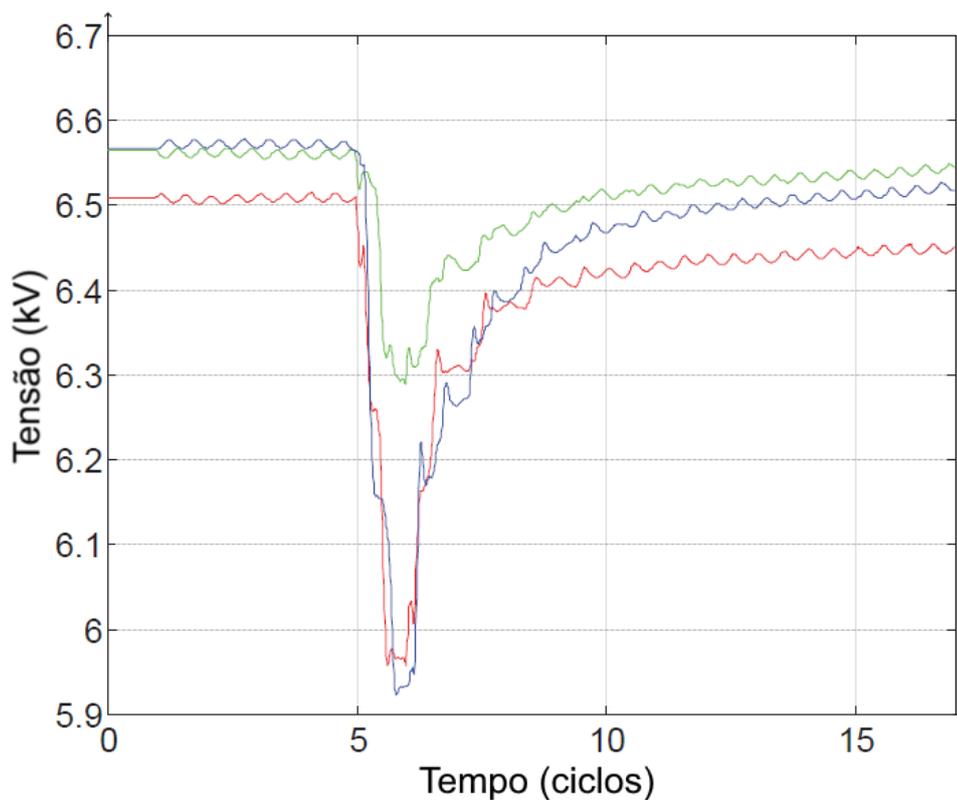


Figura 2.4 – Exemplo de Afundamento de Tensão devido a energização de transformador.

distribuição (0,5-2s) [11].

Para AMTs causados por faltas, ocorrem dois segmentos de transição, tendo geralmente o formato retangular. Um exemplo de AMT devido a curto-circuito pode ser visto na Figura 2.5, onde observa-se o segmento de recuperação da tensão prolongado devido a reaceleração de motor presente no sistema [7].

Sendo o fornecimento de energia elétrica feito geralmente por sistemas trifásicos, o curto-circuito pode ocorrer entre fases, fase e neutro, ou fase e terra, podendo envolver uma ou mais fases [11].

Em alguns casos, principalmente em redes de distribuição, as faltas podem evoluir para diferentes tipos, ocasionando AMTs com mais de 2 segmentos de transição. Um exemplo disso é uma falta monofásica evoluir para bifásica, como pode ser vista na Figura 2.6, adaptada de [7].

Devido a natureza temporária de algumas faltas, é comum a utilização de religadores no sistema de distribuição. Podem ocorrer até 3 tentativas de reestabelecimento da energia, sendo a maioria das faltas eliminadas na primeira operação [4]. No entanto, se a falta for permanente, podem ocorrer múltiplos eventos de AMT no sistema, devido a operação do religador. Os AMTs sequenciais devido a religamentos são abordados na subseção 2.4.4.

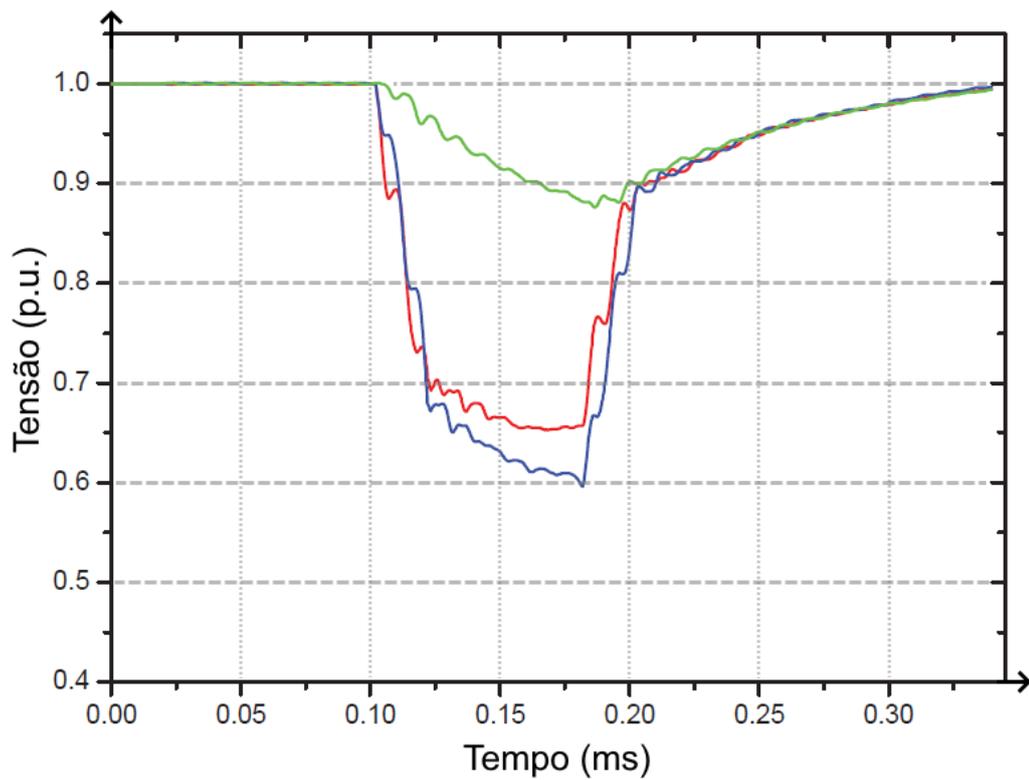


Figura 2.5 – Exemplo de Afundamento de Tensão devido a falta no sistema (curto-circuito).

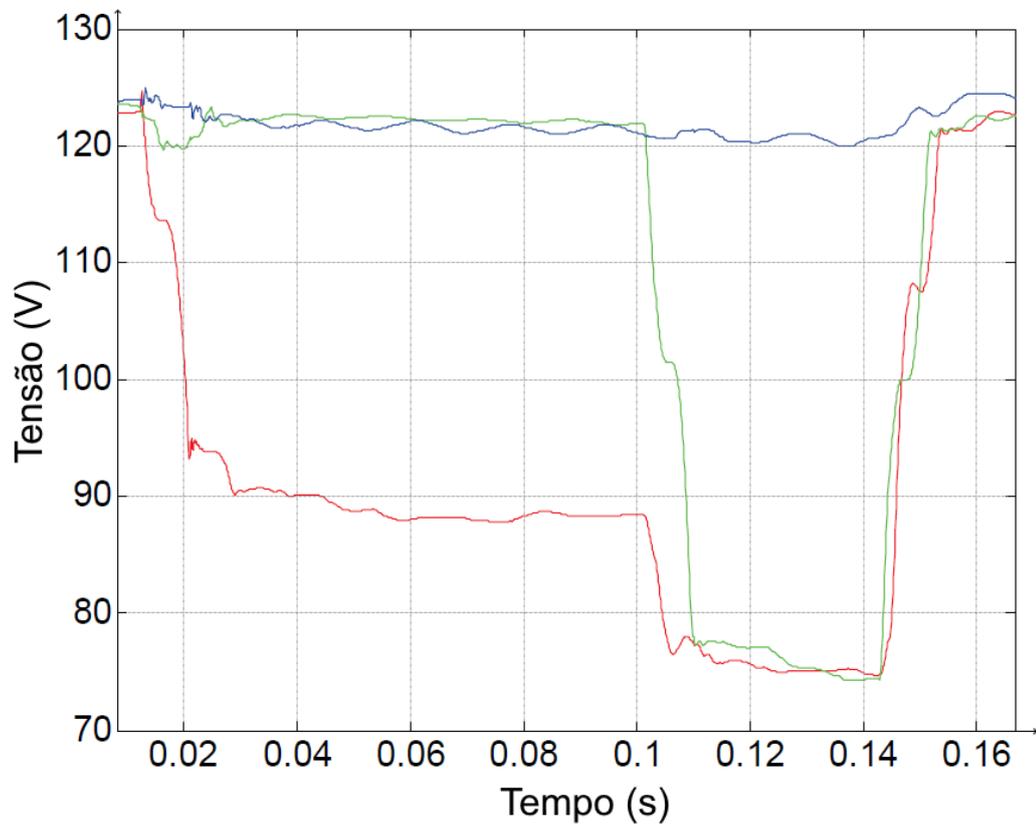


Figura 2.6 – Exemplo de Afundamento de Tensão devido a falta no sistema (curto-circuito) com evolução.

## 2.4 Outras Características dos Afundamentos de Tensão

Além da magnitude e duração, outras características são importantes para a avaliação do AMT, destacando o ponto de incidência, o salto de ângulo e o tipo de afundamento de tensão.

### 2.4.1 Ponto de Incidência na forma de onda

O ponto de incidência na forma de onda nada mais é do que o momento (caracterizado pelo ângulo, em graus) onde o AMT começa, ou termina, na forma de onda de tensão (em inglês, chamado de *point-on-wave*). O ponto de incidência pode ou não ser o mesmo para o início e fim do AMT, sendo iguais apenas para valores inteiros de duração em ciclos. É mais utilizado para indicar o início do AMT, sendo usual explicitá-lo como ponto de início na forma de onda.

Diferente do início em  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , qualquer outro ponto de incidência irá apresentar uma queda brusca na forma de onda quanto maior for a magnitude do AMT, sendo a mais notável em  $90^\circ$  (ou  $270^\circ$ ). Um exemplo disso pode ser visualizado na Figura 2.7.

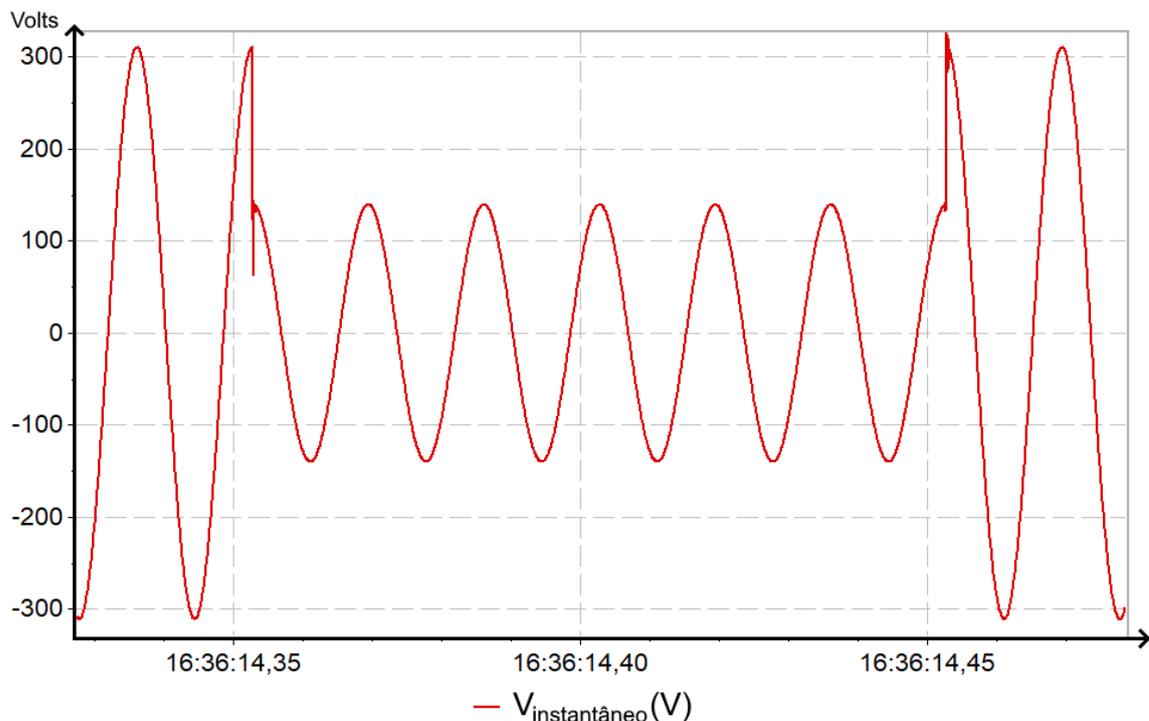


Figura 2.7 – Exemplo de AMT de 45% de magnitude e 6 ciclos de duração com ângulo de incidência em  $90^\circ$ .

### 2.4.2 Salto de Ângulo (*Phase-Shift*)

O Salto de Ângulo é um desvio na fase da tensão, podendo adiantar ou atrasar a forma de onda em sua passagem pelo zero [3]. Geralmente ocorre devido a diferença na

relação X/R entre fonte e alimentador, ou seja, não ocorre caso as relações sejam iguais [3]. Outra possível causa do salto de ângulo é a transformação do AMT para nível menor de tensão (propagação), dependendo do tipo de conexão do transformador.

### 2.4.3 Tipos de Afundamento

De forma mais simples, os AMTs que ocorrem nos terminais dos equipamentos podem ser classificados em três tipos diferentes, conforme as fases afetadas [7]. A representação desses três tipos pode ser vista na Figura 2.8, adaptada de [12].

- **Tipo I:** o afundamento de tensão ocorre principalmente em uma das tensões fase-terra;
- **Tipo II:** o afundamento de tensão ocorre principalmente em uma das tensões fase-fase;
- **Tipo III:** o afundamento de tensão é igual para as três tensões.

Tipo de AMT	Descrição	Diagrama vetorial	Forma de onda
<b>Tipo I</b>	$\bar{U}_a = \bar{V}$ $\bar{U}_b = -\frac{1}{2}\bar{V} - \frac{1}{2}j\bar{E}\sqrt{3}$ $\bar{U}_c = -\frac{1}{2}\bar{V} + \frac{1}{2}j\bar{E}\sqrt{3}$		
<b>Tipo II</b>	$\bar{U}_a = \bar{E}$ $\bar{U}_b = -\frac{1}{2}\bar{E} - \frac{1}{2}j\bar{V}\sqrt{3}$ $\bar{U}_c = -\frac{1}{2}\bar{E} + \frac{1}{2}j\bar{V}\sqrt{3}$		
<b>Tipo III</b>	$\bar{U}_a = \bar{V}$ $\bar{U}_b = -\frac{1}{2}\bar{V} - \frac{1}{2}j\bar{V}\sqrt{3}$ $\bar{U}_c = -\frac{1}{2}\bar{V} + \frac{1}{2}j\bar{V}\sqrt{3}$		

Figura 2.8 – Representação dos três principais tipos de AMT, apresentando as fórmulas, vetores e formas de onda respectivas.

Na Figura 2.8, tem-se que: V é a tensão característica do AMT, E é a tensão pré-evento, e  $U_a$ ,  $U_b$  e  $U_c$  são as tensões fase-neutro.

Enquanto a proposta do CIGRE [7] classifica os tipos de afundamentos de tensão conforme as fases predominantemente afetadas, a proposta de Bollen [3] os classifica levando em consideração o tipo de falta e os vetores das tensões fase-neutro como: **tipo A** causado por falta trifásica, **tipo B** causado por falta monofásica, **tipos C e D** causados por faltas bifásicas, enquanto **tipos E, F e G** são causados por faltas bifásicas a terra.

O estudo mais aprofundado dos tipos proposto por Bollen pode ser encontrado em [3], onde também há explicação detalhada sobre a propagação do AMT no sistema. Para este trabalho, onde o foco é a aplicação de AMTs em testes de equipamentos, será utilizada a mesma classificação de [12], tipos I, II e III, de acordo com [7].

#### 2.4.4 Evolução de falta e Critérios de Agregação

Na subseção 2.3.3, foi abordado um exemplo de falta (Figura 2.6) monofásica que evolui para falta bifásica. Para representar casos como esse, onde ocorrem eventos simultâneos, os parâmetros de magnitude e duração devem ser agregados compondo um único evento (agregação de fases) [5].

O PRODIST recomenda a agregação pela união das fases, onde a duração do evento toma como início o momento em que o primeiro evento ultrapassa determinado limite (no caso de AMT, 90% do valor da tensão de referência), e como fim o instante em que o último evento retorna para determinado limiar [5]. Outras alternativas também podem ser utilizadas, como a agregação por parâmetros críticos ou a agregação pela fase crítica.

Para eventos consecutivos, como os AMTs sequenciais devido a atuação de religador, no mesmo ponto de medição, no período de três minutos, deve ser feita a agregação temporal [5].

A simplificação do AMT para apenas características de magnitude e duração é muito discutida na literatura. Para agregação temporal, por exemplo, do ponto de vista da sensibilidade dos equipamentos, essa abordagem pode ser enganosa [7], pois o impacto de um evento único pode ser diferente do impacto de uma série de eventos consecutivos.

## 2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos acerca dos Afundamentos Momentâneos de Tensão, contemplando definição, causas e demais características associadas ao evento.

Dentre tantas características, além dos parâmetros duração e magnitude, destacam-se o tipo de afundamento, o ponto de incidência na forma de onda e o salto de ângulo.

No próximo capítulo serão discutidos os efeitos causados por esse tipo de evento.

## 3 Efeitos dos Afundamentos Momentâneos de Tensão

### 3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão abordados os efeitos dos Afundamentos Momentâneos de Tensão nos equipamentos elétricos, bem como as consequências de suas falhas para os consumidores residenciais, comerciais e industriais, principalmente sob o aspecto financeiro. Antes disso, introduz-se o conceito de curva de sensibilidade, bem como sua aplicação na análise do impacto dos AMTs sobre os equipamentos e processos.

Ao final do capítulo são apresentadas as principais medidas aplicáveis para mitigação dos efeitos dos AMTs, tanto do lado da concessionária como do consumidor.

### 3.2 Sensibilidade dos Equipamentos

Os equipamentos elétricos podem apresentar mau funcionamento quando submetidos a AMTs, variando desde simples travamentos a perda de funcionalidade completa [4].

A capacidade de um equipamento tolerar um determinado AMT sem que haja perda de funcionalidade é chamada de suportabilidade, ou, inversamente, sensibilidade. Os dispositivos podem ser sensíveis a:

- magnitude do afundamento de tensão;
- magnitude e duração do afundamento de tensão;
- outras características dos afundamentos de tensão, destacando o ponto de início do evento e o salto de ângulo.

### 3.3 Curvas de Suportabilidade

As curvas de sensibilidade caracterizam o desempenho dos equipamentos quando submetidos a AMTs, delimitando regiões de operação em função da magnitude e duração dos eventos. Um exemplo de curva de sensibilidade pode ser visto na Figura 3.1, que apresenta um padrão retangular, caracterizado pelas regiões A (imunidade) e C (susceptibilidade).

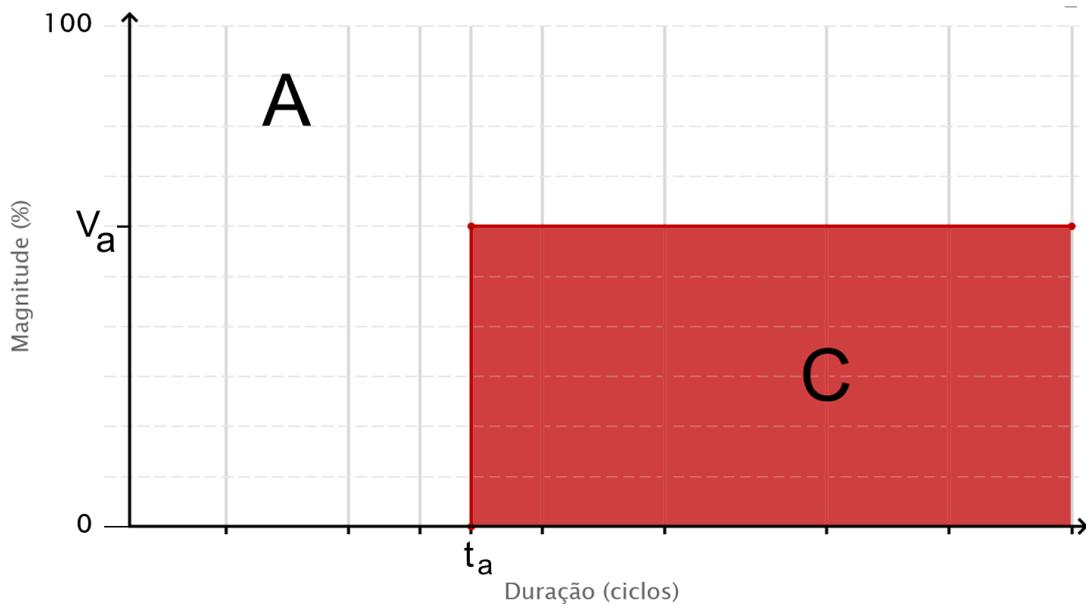


Figura 3.1 – Exemplo de curva de sensibilidade genérica de formato retangular.

Algumas curvas, no entanto, podem apresentar variações quanto ao seu formato, com diferentes pontos de magnitude e duração que irão determinar sua forma. Tais características costumam variar conforme o tipo de equipamento.

Para analisar a probabilidade de um equipamento apresentar falha, pode-se fazer a sobreposição dos eventos registrados sobre a curva de sensibilidade. Na Figura 3.2, por exemplo, são sobrepostos 10 eventos de AMT, dentre os quais 4 ocorrem na região de suscetibilidade, enquanto os outros 6 na região de imunidade.

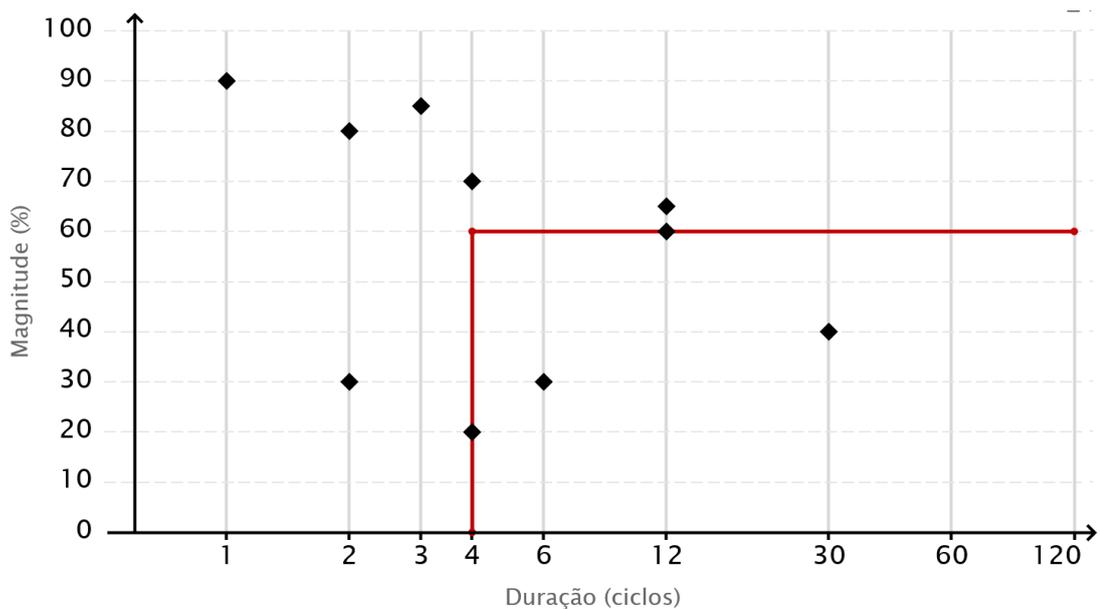


Figura 3.2 – Exemplo de curva de sensibilidade com sobreposição de eventos de afundamento.

Algumas curvas de sensibilidade amplamente conhecidas são apresentadas nos subtópicos seguintes.

### 3.3.1 CBEMA/ITI

A curva CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*), atualizada para curva ITI (*Information Technology Industry Council*), se refere a equipamentos de computador e tecnologia da informação (TI) alimentados por fontes de tensão chaveadas (SMPS - *Switched-Mode Power Supplies*). A curva ITI adaptada para visualizar apenas a parte referente a AMTs pode ser vista na Figura 3.3. A região A refere-se a imunidade, onde não deve ocorrer falhas, e a região C, de suscetibilidade, onde pode ocorrer falha.

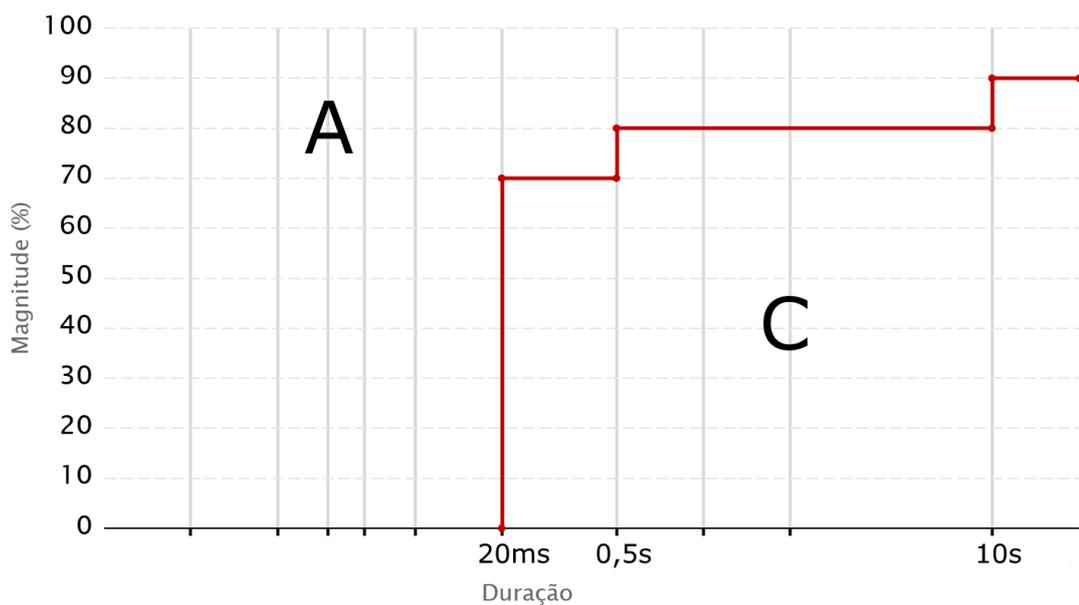


Figura 3.3 – Curva ITI.

### 3.3.2 SEMI F47

A curva SEMI (*Semiconductor Equipment Materials International*), por sua vez, especifica características de suportabilidade dos equipamentos pertencentes à indústria de semicondutores, e pode ser vista na Figura 3.4.

## 3.4 Efeitos e Impacto Financeiro dos AMTs

Esta seção irá abordar os efeitos dos AMTs, explorando inicialmente seu impacto nos equipamentos elétricos, para então discorrer sobre os efeitos nos consumidores, e finalmente o impacto financeiro.

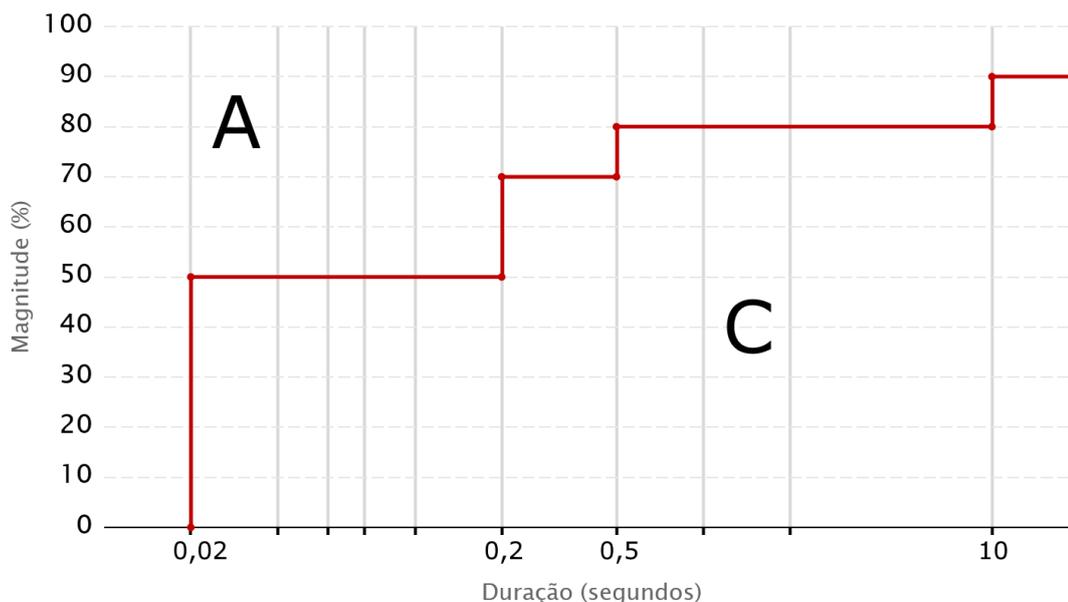


Figura 3.4 – Curva SEMI F47.

### 3.4.1 Efeitos nos Equipamentos Industriais

#### 3.4.1.1 Contatores

Dentre os equipamentos elétricos mais sensíveis a AMTs, destacam-se o Contator Eletromagnético e o Conversor de Frequência. O Contator eletromagnético em corrente alternada (Contator CA) tem grande utilização nos processos industriais para comando e acionamento de motores.

Da literatura técnica, sabe-se que os contatores apresentam sensibilidades distintas para os diferentes ângulos de incidência dos afundamentos [13], havendo pouca sensibilidade a salto de ângulo [14]. Em [15], ocorre o estudo dos AMTs sequenciais, relacionando a influência do contator CA ao MIT associado.

Na Figura 3.5, adaptada de [14], observa-se as curvas de sensibilidade de um mesmo contator para diferentes pontos de incidência do AMT: de  $0^\circ$  a  $240^\circ$ , em passos de  $30^\circ$ . As variações no formato da curva de sensibilidade mostra que ocorre diferentes valores de magnitude e duração suportados conforme varia o ângulo de incidência. Já na Figura 3.6, também adaptada de [14], observa-se as curvas de sensibilidade para 6 (seis) modelos de contator. Apesar de variados valores de magnitude e duração suportados, ocorre semelhança no formato da curva, apresentando uma curvatura característica.

#### 3.4.1.2 Controladores Lógicos Programáveis

Outros componentes comumente citados como sensíveis a AMTs são os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), utilizados no controle de processos industriais, e as fontes chaveadas, utilizadas para fornecer tensão contínua para equipamentos eletrônicos

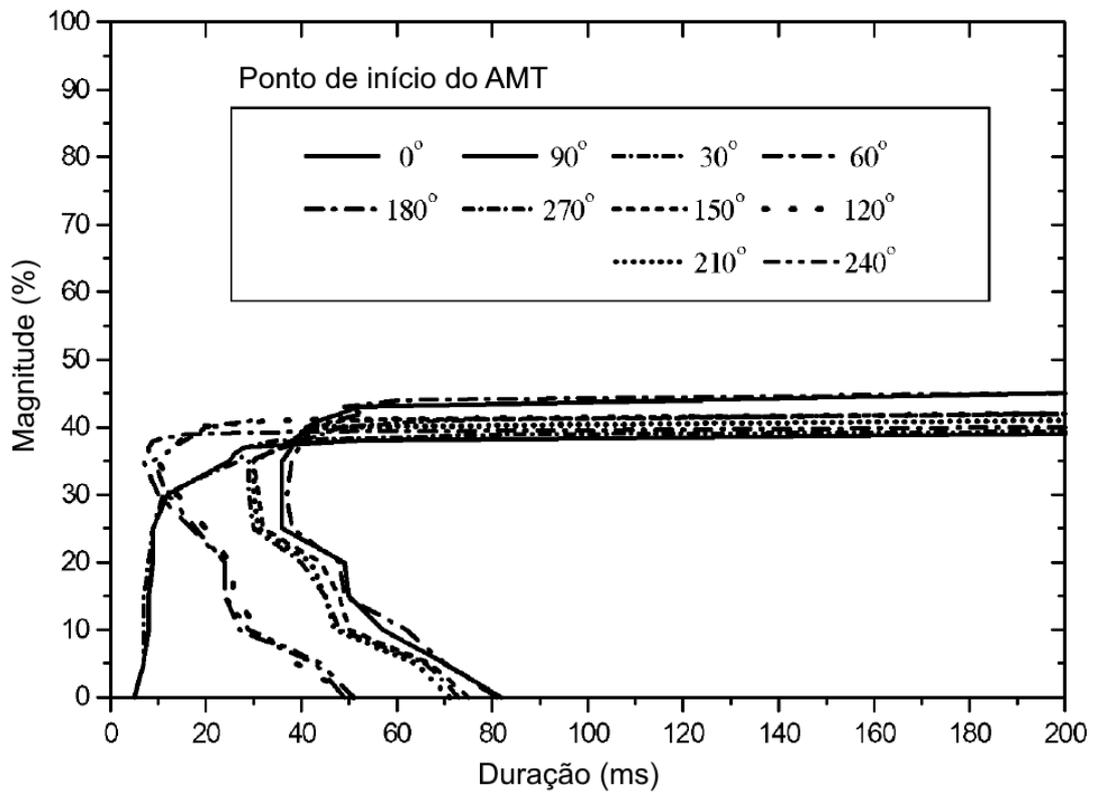


Figura 3.5 – Exemplo de curvas de sensibilidade de um contator para diferentes pontos de incidência do AMT.

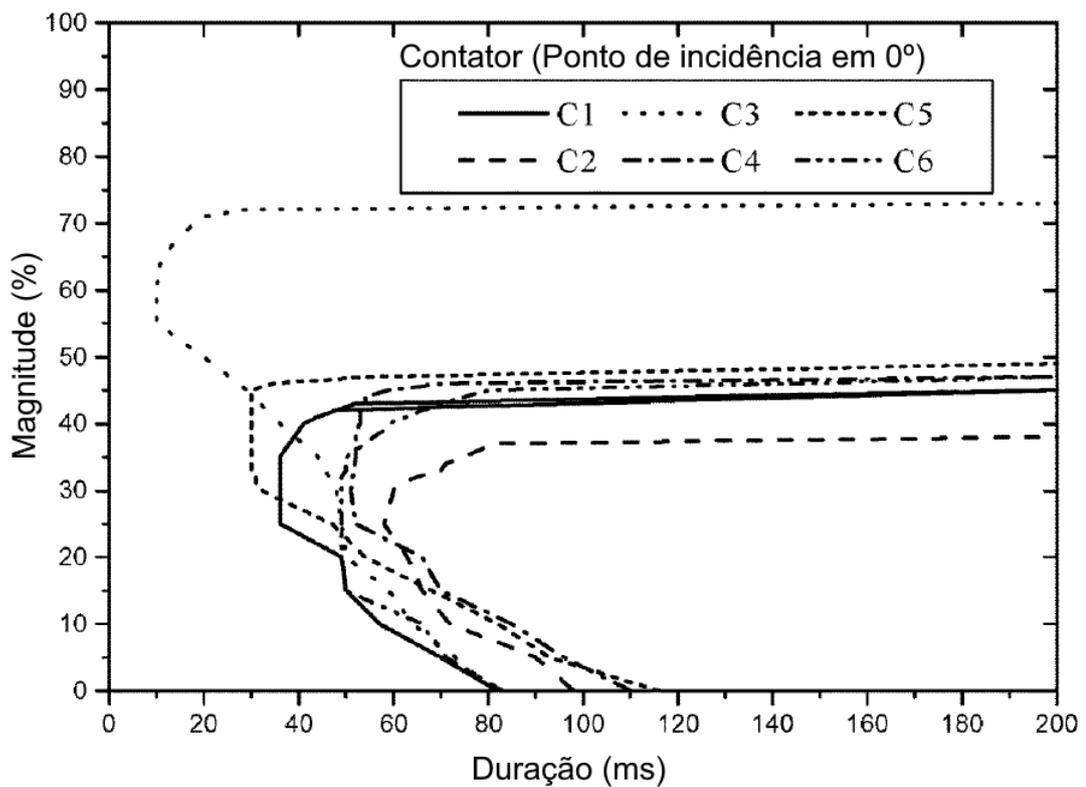


Figura 3.6 – Exemplo de curvas de sensibilidade de diferentes modelos de contator para ponto de incidência em 0°.

(como computadores e CLPs). O Conversor de Frequência, ou Conversor de Velocidade Variável (CVV) também tem grande destaque, sobretudo devido ao seu papel importante na partida e controle de motores.

O estudo da sensibilidade em CLPs frente a diferentes ângulos de incidência é feito em [16], enquanto em [17] é feito teste com diferentes componentes harmônicas de tensão, sendo analisados diversos modelos de CLP. Ambos casos concluem que não há variação de sensibilidade devido a diferentes ângulos de incidência, e em [17] ocorre erro na saída (*output*) do CLP em uma composição harmônica específica. A sensibilidade de CVV é abordada em [18] e [19], sendo um componente de alta sensibilidade a diferentes tipos de AMT, e um dos equipamentos mais sensíveis e causadores de paradas de processo.

Observa-se na Figura 3.7, adaptada de [16], as curvas de sensibilidade obtidas para diferentes pontos de incidência: de  $0^\circ$  a  $315^\circ$ , em passos de  $45^\circ$ . Ocorre pouca variação na sensibilidade do equipamento, havendo diferença de 30ms para o caso de 0%, comparando-se os ângulos de  $0^\circ$  e  $225^\circ$ , concluindo que há pouca influência do ângulo de incidência do AMT na sensibilidade de CLPs.

Na Figura 3.8, adaptada de [17], são apresentadas curvas de 9 (nove) modelos diferentes de CLP, considerando-se apenas magnitude e duração do AMT. Algumas apresentam padrão retangular, e a maioria suportabilidade a AMTs de até 30% de magnitude. Na Figura 3.9, é feita a comparação entre dois CLPs, ao se acrescentar uma capacitância extra em paralelo ao CLP P1, igualando a capacitância equivalente do CLP P4. Observa-se que apesar da melhoria na suportabilidade do CLP P1, as curvas não são iguais, devido aos diferentes tipos de chaveamento utilizado.

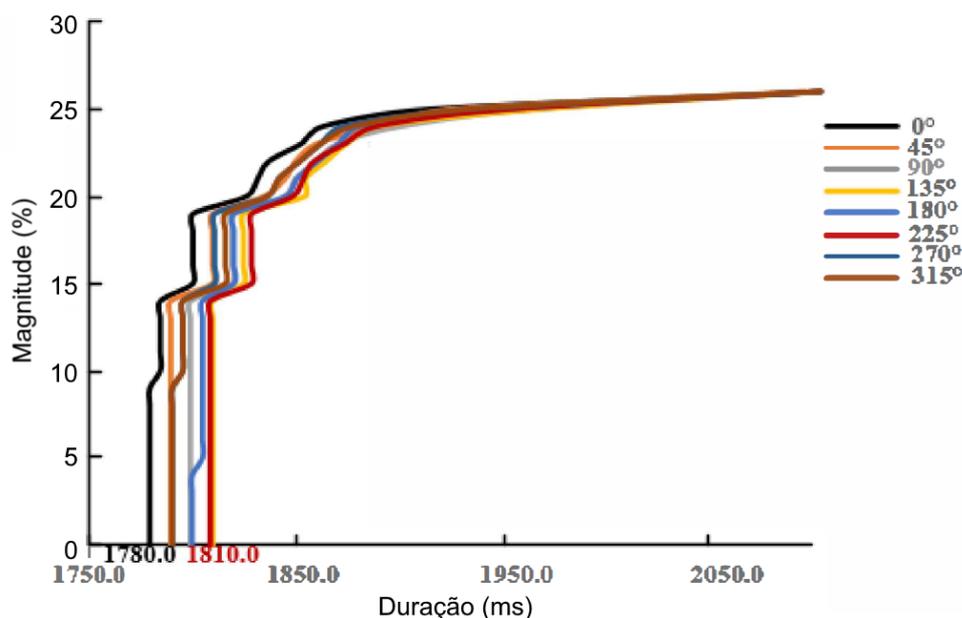


Figura 3.7 – Exemplo de curvas de sensibilidade de um CLP para diferentes pontos de incidência do AMT.

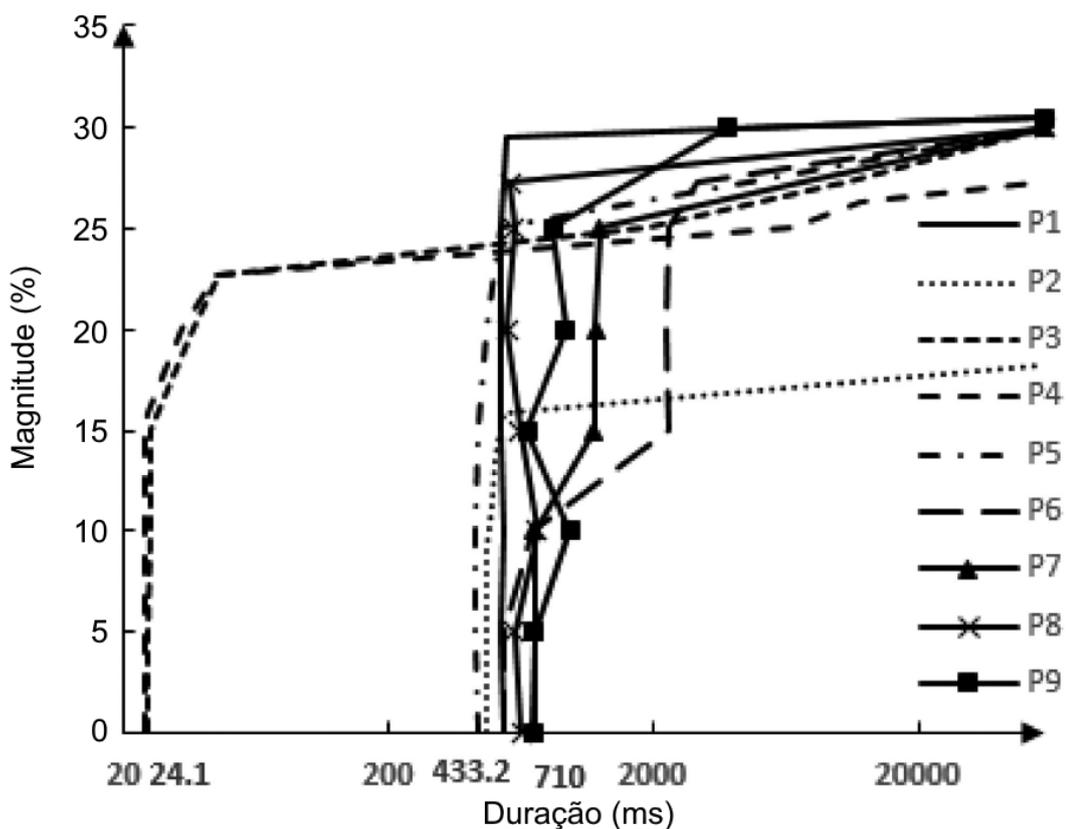


Figura 3.8 – Exemplo de curvas de sensibilidade de diferentes modelos de CLP.

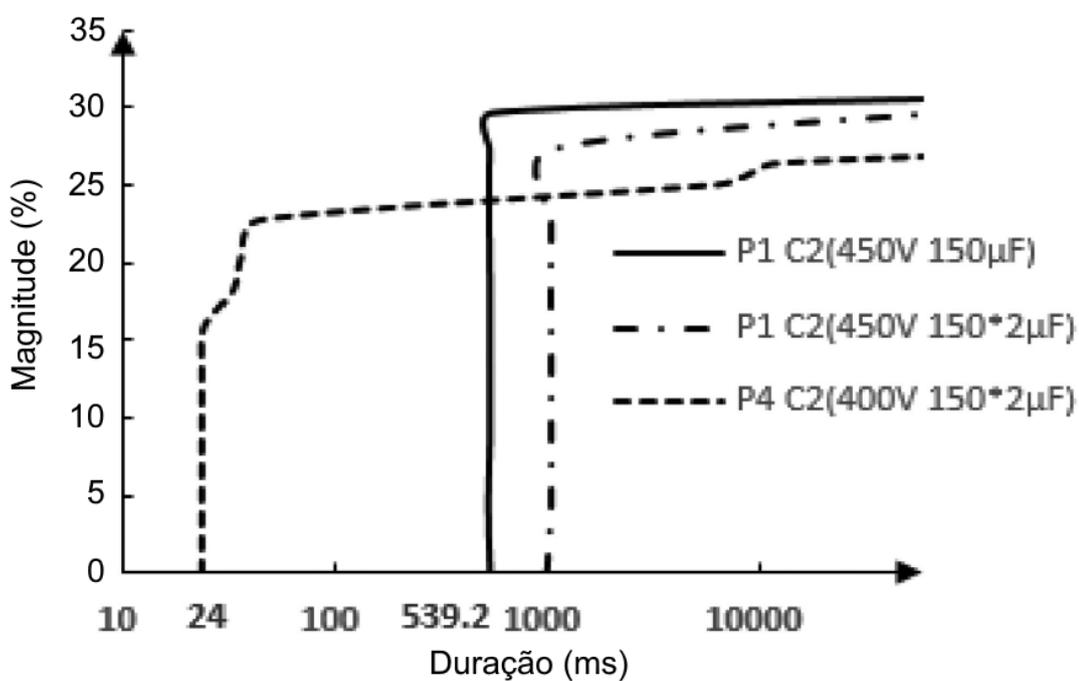


Figura 3.9 – Exemplo de curvas de sensibilidade de diferentes modelos de CLP ao aumentar a capacitância do modelo P1.

### 3.4.1.3 Fontes Chaveadas

As Fontes Chaveadas (*Switched-Mode Power Supply* - SMPS) podem alimentar pequenas cargas, geralmente de controle ou comando, em corrente contínua, como relés, equipamentos eletrônicos, e até mesmo contadores e CLPs, sendo também utilizadas como fontes de computadores. Em geral, possuem dois tipos de retificação, a comum, onde ocorre picos de corrente, e a com circuito de correção de fator de potência (*Power Factor Correction* - PFC). Em [20] é feita abordagem de testes de AMTs e harmônicos em fontes comuns (sem PFC), com continuidade ao estudo, em [21], com a comparação com fonte com PFC. Testes de sensibilidade em computadores são realizados em [22] e [23], onde é feita análise do efeito do AMT quanto a travamento no *hardware* e *software*.

Para um computador, diferentes falhas operacionais podem ocorrer, como visto na Figura 3.10, adaptada de [22]. São obtidas 3 (três) curvas de sensibilidade para um mesmo computador, mostrando a importância de se definir as condições de falha do equipamento para caracterização da curva de sensibilidade. A primeira curva indica travamento nas operações de leitura e escrita de dados, a segunda curva indica ocorrência de problemas no sistema operacional (SO) da máquina, e a terceira curva o caso de reinício do computador.

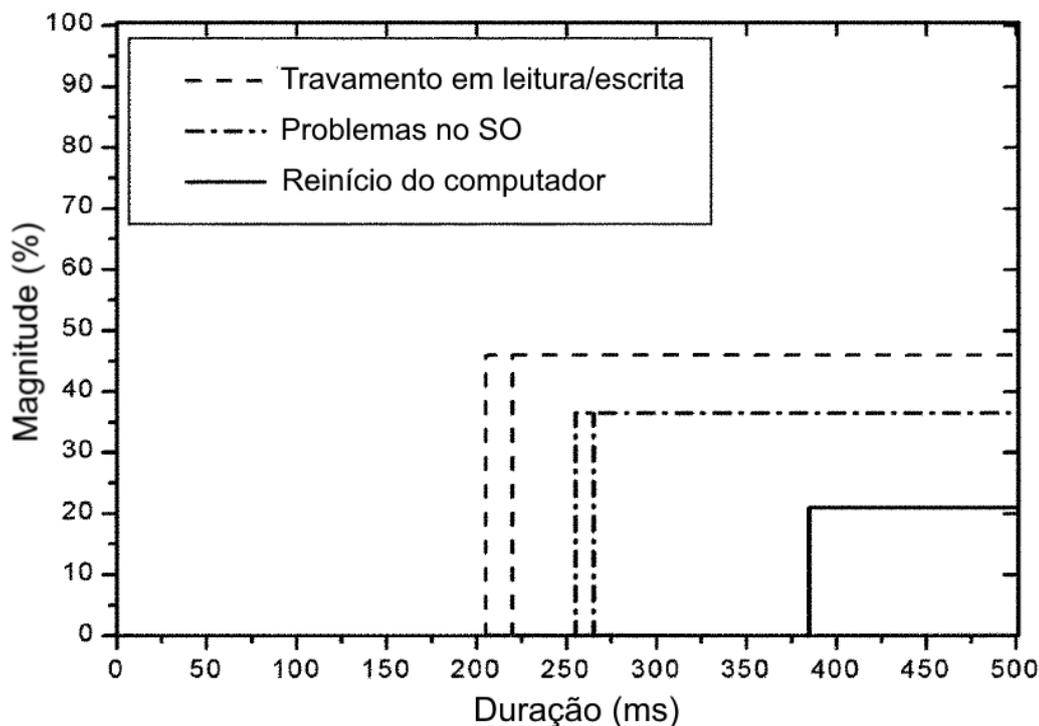


Figura 3.10 – Exemplo de curvas de sensibilidade de um computador (alimentado por fonte chaveada) para 3 condições de falha diferentes.

### 3.4.2 Sensibilidade de Processo

Num processo industrial, diversos dispositivos operam em conjunto, cada qual com sua respectiva sensibilidade a AMTs. Muito frequentemente, os processos industriais falham devido a a suscetibilidade dos dispositivos de controle e proteção, que não são levados em consideração inicialmente na sensibilidade de processo, além dos equipamentos mais conhecidos como contadores, CLPs e CVVs. Devido a diversidade de componentes num processo industrial e suas características distintas, cada caso resulta em um estudo de caso único [7].

A avaliação da imunidade de processo a AMT visa identificar o equipamento crítico utilizado dentro do processo. Para isso, o conceito geral de Tempo de Imunidade de Processo (TIP) é necessário, de forma a se analisar quais parâmetros de processo estão vinculados a dispositivos específicos [7]. A restauração de um processo será bem sucedida apenas se a duração do AMT,  $t_{amt}$ , somado ao tempo de restauração (ou reinício) do equipamento,  $t_{reinício}$  for menor que o valor do TIP:  $t_{amt} + t_{reinício} < TIP$ . Isso pode ser ilustrado na Figura 3.11, adaptada de [7], onde pode-se consultar o assunto detalhadamente.

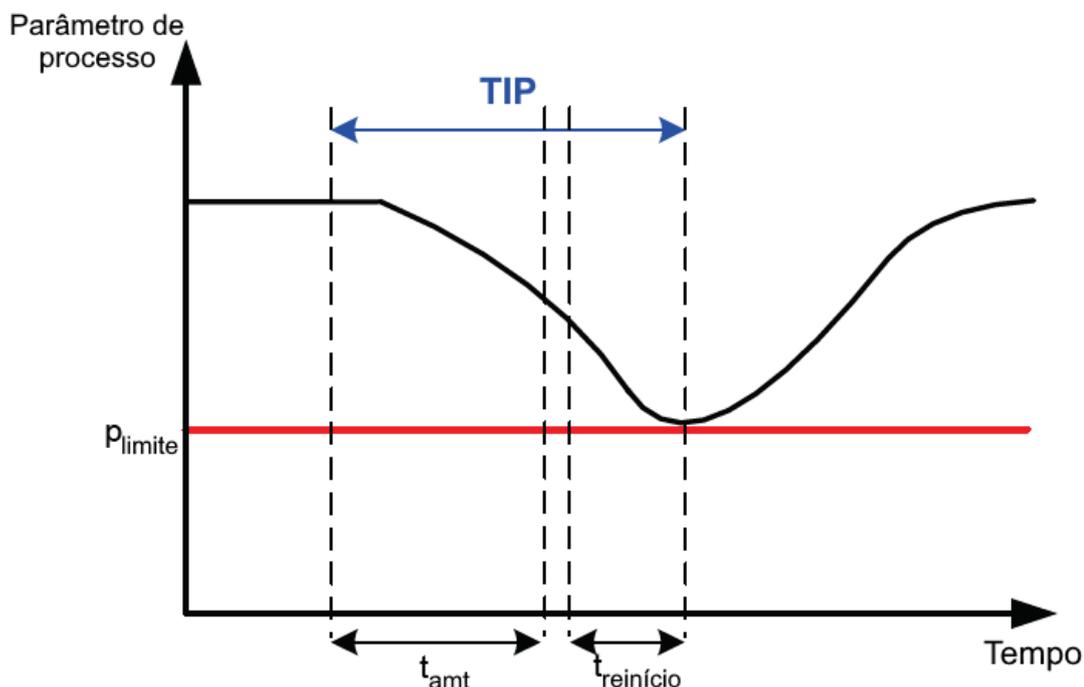


Figura 3.11 – Reinício de processo bem sucedido após AMT de duração  $t_{amt}$ .

### 3.4.3 Impacto nos Consumidores

Para os consumidores residenciais, o AMT geralmente implica apenas em leves inconveniências pelo mau-funcionamento dos equipamentos [24]. Para trabalhadores em *home-office* (trabalho remoto), pode ocorrer perda de trabalho não salvo ou desconexão

de um reunião *online*, por exemplo, devido a falha da fonte do computador, causando inconvenientes mais significativos.

Quanto aos consumidores comerciais, o reinício de computadores e outros equipamentos pode acarretar em perda de produtividade e insatisfação dos clientes, como no reinício de um sistema de caixa de loja.

Assim, apesar da perda financeira ser significativamente baixa para os consumidores residenciais e comerciais, ocorre prejuízo quanto a imagem da concessionária de energia frente aos consumidores, afetando a satisfação perante o serviço prestado [24].

No âmbito industrial, entretanto, é onde ocorre maior prejuízo financeiro associado a ocorrência de AMTs. Dentre os diversos itens que compõem a perda financeira, pode-se listar [25], [7], [26]:

- perda de insumos;
- limpeza de maquinário;
- mão de obra ociosa;
- tempo de parada de produção;
- tempo de reinício de processos;
- queda de competitividade;
- perda de vida útil de equipamentos;

O custo de reinício de processos deve ser levado em consideração principalmente em relação a processos de produção contínuos, onde o tempo de reinício é, por regra, muito longo [11]. Além das possíveis perdas financeiras, a parada intempestiva de um processo industrial devido a AMTs, pode por em risco a segurança não só dos processos, mas como também de pessoas [26]. A estimativa de custos por parada é abordada de forma mais detalhada em [27].

Certos tipos de indústrias possuem custo maior por parada devido a AMT. Na China, o custo de parada de uma indústria química varia de 0,8 a 8,9 milhões de yuans chineses (0,12 a 1,36 milhões de dólares, em conversão direta), enquanto que para a indústria de semicondutores o valor fica entre 4 a 25 milhões [28]. Na Malásia, para indústrias de cerâmicas, vidro e cimento estima-se o custo de 400 mil ringuites malaios (aproximadamente 100 mil dólares), e da ordem de 0,5 a 3 milhões (120 a 730 mil dólares) para indústria de semicondutores [29]. Ainda segundo [29], o custo por parada da indústria de semicondutores na União Europeia tem custo típico de 3,8 milhões de euros (4,5 milhões de dólares), e 2,5 milhões de dólares nos Estados Unidos.

Já em âmbito nacional, o custo devido à QEE arcado apenas pelo consumidor tem maior concentração de casos da ordem de R\$ 60 mil (US\$ 24 mil, em conversão direta utilizando a cotação da época do documento de referência - 2015) por parada de processo, com outros casos de custo menor, R\$ 10 mil (US\$ 4 mil), bem como uma quantidade menor de casos com custos da ordem de R\$ 100 mil e R\$ 500 mil (US\$ 40 mil e US\$ 200 mil) ou mais [26]. Para uma certa associada da ABRACE, entre 2014 e 2015, houveram 20 eventos ocasionando perda de 100 a 500 mil reais, e mais de 10 eventos com custo acima de 1 milhão (US\$ 400 mil). O documento ainda comenta sobre a dificuldade de especificar a causa da parada devido a ausência de dados de medição fornecidos pela concessionária, tratando as causas como eventos de QEE de forma geral.

### 3.5 Mitigação dos Afundamentos de Tensão

De forma a se evitar os efeitos adversos dos AMTs, eliminá-los seria a solução óbvia. Porém, devido às suas características aleatórias e a natureza física da rede elétrica, torna-se algo inviável. Pode-se, no entanto, tomar medidas visando mitigar ou amenizar os efeitos indesejáveis causados pelos AMTs.

As medidas podem ser realizadas tanto do lado do consumidor, como do lado da concessionária, havendo aumento do custo conforme ocorre o distanciamento do equipamento sensível do consumidor [4], conforme a Figura 3.12.

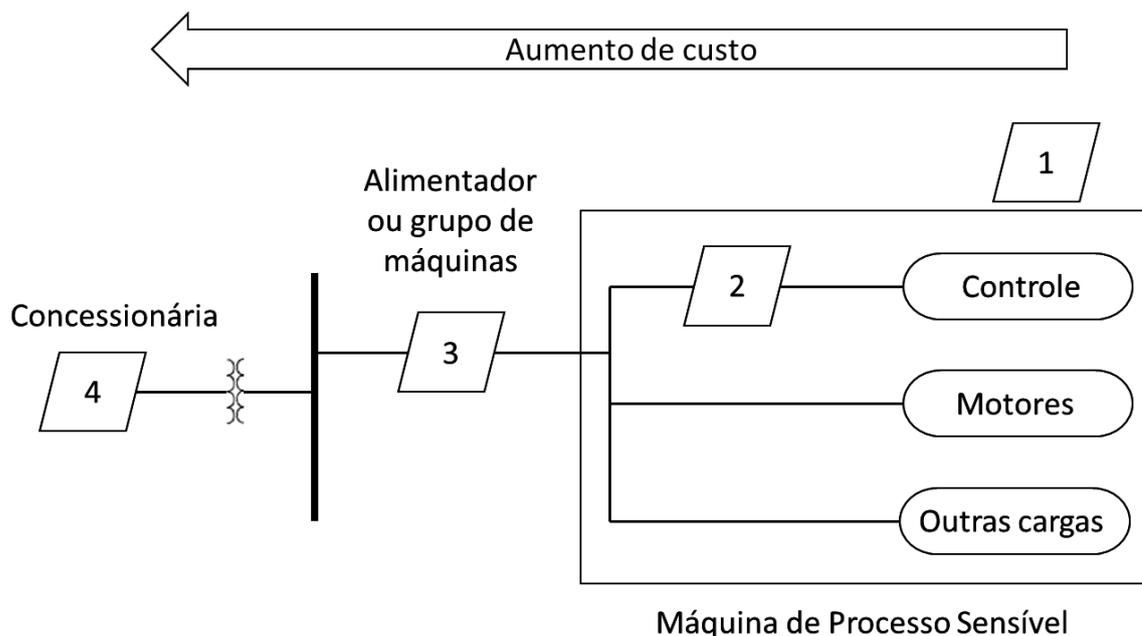


Figura 3.12 – Aumento de custos de medidas de mitigação conforme a proximidade à concessionária.

Onde:

1. Especificações de equipamento;
2. Proteção do Controle;
3. Proteção geral dentro da Planta;
4. Soluções na concessionária.

A partir do diagrama esquemático apresentado na Figura 3.13 [3], pode-se distinguir os principais métodos de mitigação:

- reduzir o número de faltas devido a curto-circuito;
- reduzir o tempo de eliminação de falta;
- reconfigurar o sistema de forma a faltas ocasionarem eventos menos severos nos terminais dos equipamentos dos consumidores;
- conectar equipamentos de mitigação entre o equipamento sensível e a rede;
- melhorar a imunidade do equipamento sensível.

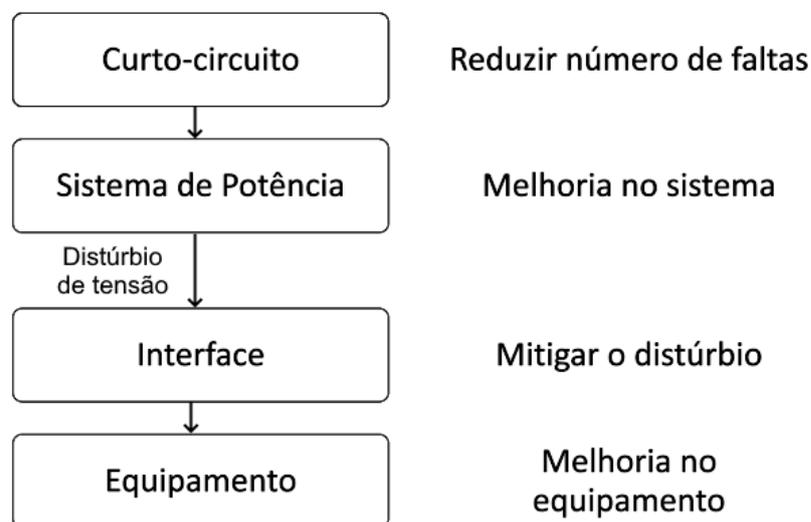


Figura 3.13 – Métodos de mitigação de AMTs segundo Bollen.

Pelo lado da concessionária, são notáveis as medidas de manutenção que podem ser tomadas para se evitar AMTs diretamente em sua origem, como a poda de árvores e a troca ou substituição de equipamentos (ou componentes) que estejam com o isolamento comprometido. O alto custo, no entanto, está na parte de investimentos, como na troca de cabos (devido a transição da rede exposta para isolada), ou até mesmo na substituição para rede subterrânea. O entendimento mútuo é necessário para resolver o problema entre

o operador do sistema e o consumidor industrial [30], sendo necessário monitoramento para atender tal finalidade. O estudo de localização de faltas [31], por exemplo, é de grande importância para que a concessionária identifique possíveis áreas onde possa implementar melhorias.

Já pelo lado do consumidor, há opções de utilização de armazenadores de energia, como *no-breaks* e UPS (*Uninterruptible Power Supply*), e DVRs, utilização de transformadores ferromagnéticos como medidas para que os equipamentos elétricos possam suportar os AMTs [3], [7]. Há também a opção de substituição de equipamentos sensíveis por equipamentos menos vulneráveis. Todas opções, no entanto, envolvem custos para o consumidor. AMTs devem ser considerados durante o projeto da instalação industrial, levando em consideração os fatores econômicos, buscando cooperação entre os engenheiros eletricitistas e de projetos [30].

A alimentação em corrente contínua pode ser uma forma de se evitar o efeito adverso dos AMTs nos equipamentos [7]. O Contator em corrente contínua (Contator CC) pode ser um substituto para a versão em corrente alternada, apesar de ter uma bobina um pouco maior e necessitar de uma fonte auxiliar.

Quanto aos fabricantes de equipamentos, cabem melhorias que podem ser feitas para que estes se tornem mais robustos, suportando AMTs mais severos [30], podendo haver a criação de um selo específico para equipamentos mais robustos.

Ademais, a sensibilidade dos equipamentos é um tema onde há a necessidade de contínua atualização, pois, conforme evoluem os componentes e tecnologias utilizadas nos equipamentos eletro-eletrônicos, altera-se o comportamento frente a AMTs. Os computadores de mesa, por exemplo, tem passado por alterações em seus componentes, que vão desde a fonte de alimentação - agora com circuito de correção de fator de potência - à unidades de armazenamento, havendo substituição dos HDs por SSDs. As unidades de CD ou DVD-ROM também tem caído em desuso, em vista da maior praticidade de transferência de arquivos por *flashdrives* ou nuvem. A suportabilidade dos computadores utilizados há duas décadas, por exemplo, já não é a mesma dos computadores mais recentes.

## 3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordadas as questões referentes à sensibilidade dos equipamentos elétricos frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão, sendo discutidas as curvas de suportabilidade e sua utilização.

Os tópicos sobre o impacto financeiro dos AMTs foram também abordados, com destaque para o consumidor industrial, o mais afetado por esses eventos. Neste contexto, os principais equipamentos elétricos utilizados em sistema industriais (contatores, fontes

e CLPs) foram escolhidos para serem testados.

No próximo capítulo são abordadas as metodologias utilizadas para o levantamento das curvas de sensibilidade, já que até aqui viu-se apenas curvas obtidas da literatura técnica, sem detalhamento de sua obtenção.

# 4 Metodologia para Testes em Equipamentos Frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão

## 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão abordadas as principais metodologias existentes para a realização de testes de Afundamentos Momentâneos de Tensão em equipamentos, desde testes de compatibilidade com curvas pré-existentes, a testes de suportabilidade, de modo a levantar dados necessários para obter a curva de sensibilidade de determinado equipamento.

Ao final do capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para a realização de testes laboratoriais, bem como as características dos equipamentos utilizados na bancada de testes, incluindo o *Real-Time Digital Simulator* (RTDS).

## 4.2 Teste de Compatibilidade x Teste de Suportabilidade

No teste de compatibilidade, o equipamento é submetido a alguns pontos específicos de AMT para aferição com uma tabela (IEC) ou curva (ITI, SEMI, etc). São testes mais rápidos, visto que há necessidade de se aplicar poucos valores amostrados de magnitude e duração da curva pré-existente.

Já no teste de suportabilidade são testados vários pontos para obtenção da curva de sensibilidade do equipamento, de acordo com algum método de caracterização. Neste caso, são testes mais demorados e que podem causar danos aos equipamentos, em virtude da grande quantidade de AMTs aplicados.

Neste estudo, como o foco é a obtenção da sensibilidade dos equipamentos, serão abordados com maior profundidade os métodos de teste de suportabilidade existentes.

## 4.3 IEC 61000-4-11

A IEC 61000-4-11 [32] não apresenta em si uma metodologia para testes em equipamentos, de forma a obter as curvas de sensibilidade, recomenda apenas uma tabela (Tabela 4.1) com pontos específicos a serem testados de acordo com a classe do equipamento.

Tabela 4.1 – Tabela IEC

Classe	Nível de magnitude e duração para teste de AMT				
Classe 2	0% durante $\frac{1}{2}$ ciclo	0% durante 1 ciclo	70% durante 30 ciclos		
Classe 3	0% durante $\frac{1}{2}$ ciclo	0% durante 1 ciclo	40% durante 12 ciclos	70% durante 30 ciclos	80% durante 300 ciclos

Para a **Classe 1**, não presente na tabela, é necessário estudo caso-a-caso conforme equipamento, já que é uma classe aplicada a equipamentos especiais de maior sensibilidade, como instrumentação de laboratórios tecnológicos, alguns equipamentos de proteção e automação e computadores, que necessitam de UPS, filtros ou supressores de surto. A **Classe 2** se aplica a pontos de acoplamento comum e na planta do ambiente industrial em geral. Já a **Classe 3** é aplicável a ponto de acoplamento na planta no ambiente industrial, considerada, por exemplo, quando maioria da carga é alimentada por conversores, quando há presença de máquinas de solda, motores de grande potência com partidas frequentes, ou quando as cargas variam rapidamente, conforme [32].

## 4.4 IEEE 1668

O texto da IEEE 1668 - *IEEE Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V* [12] - contém em seus anexos diferentes métodos de caracterização de curva de sensibilidade, além de tabelas com pontos específicos para testes de compatibilidade, para equipamentos mono ou trifásicos. O documento também apresenta explicação sobre os estados do equipamento sob teste (EST), recuperação assistida ou auto-recuperação, dentre outros critérios de padronização.

Para caracterização das curvas de sensibilidade, os três métodos propostos recomendam os seguintes valores para magnitude e duração dos testes:

- Magnitude mínima: 0% da nominal;
- Magnitude máxima: 85% da nominal;
- Intervalo de magnitude: 5% da nominal;
- Duração mínima: 1 ciclo (0,02 s);
- Duração máxima: 120 ciclos (2 s);
- Pontos de Duração: 1 ciclo (0,02 s), 3 ciclos(0,05 s), 6 ciclos (0,1 s), 12 ciclos(0,2 s), 30 ciclos(0,5 s), 60 ciclos(1 s) e 120 ciclos (2 s).

### 4.4.1 Top-down e Box-in

O método *Top-down* [12] consiste em manter uma duração fixa para a sequência de testes, e diminuir a magnitude de tensão, por isso o nome *Top-down* (topo-baixo, indicando a direção percorrida no gráfico). O fluxograma para os laços e passos de testes são vistos na Figura 4.1, e a curva explicativa pode ser vista na Figura 4.2.

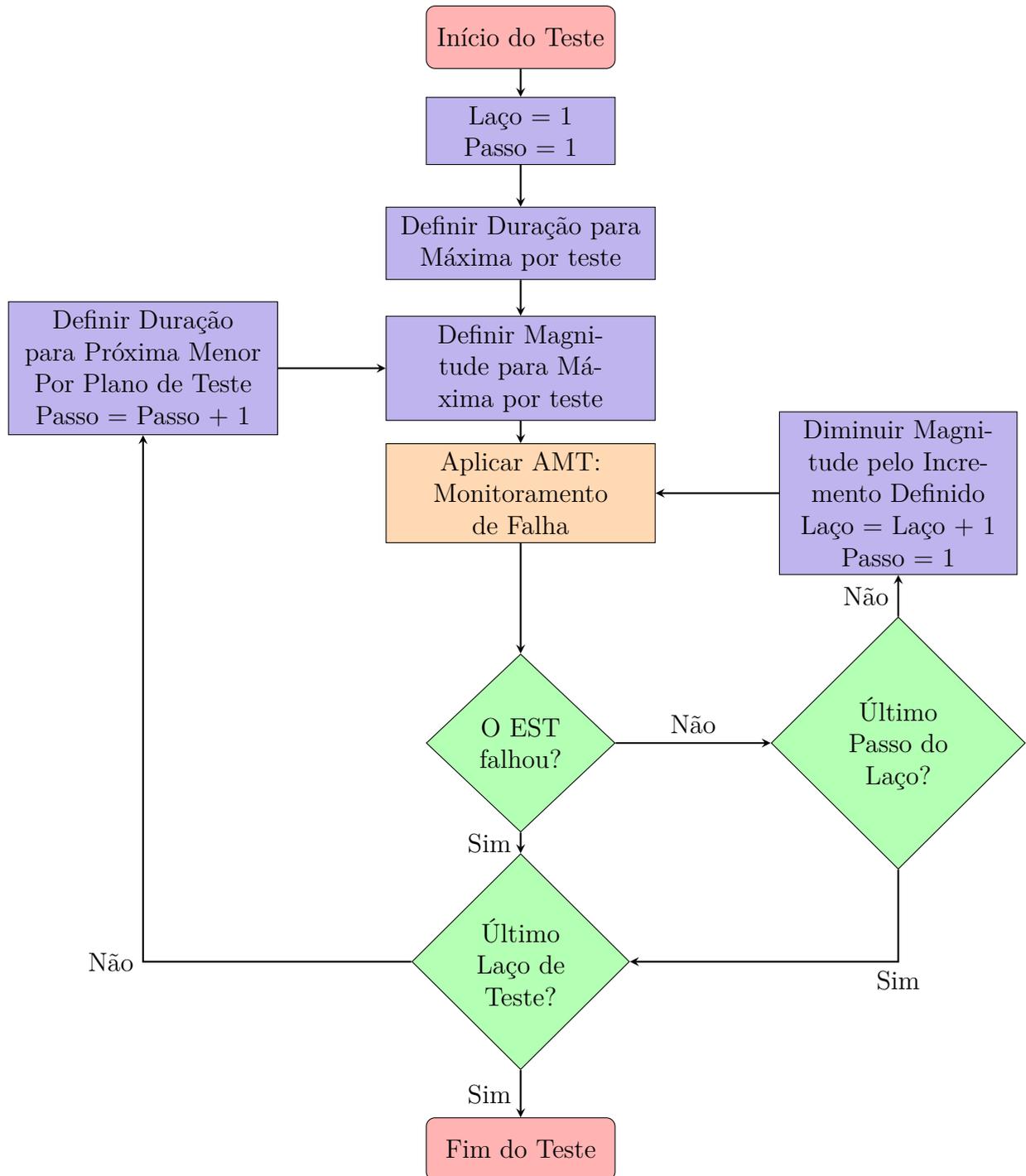


Figura 4.1 – Fluxograma para o método *Top-Down*.

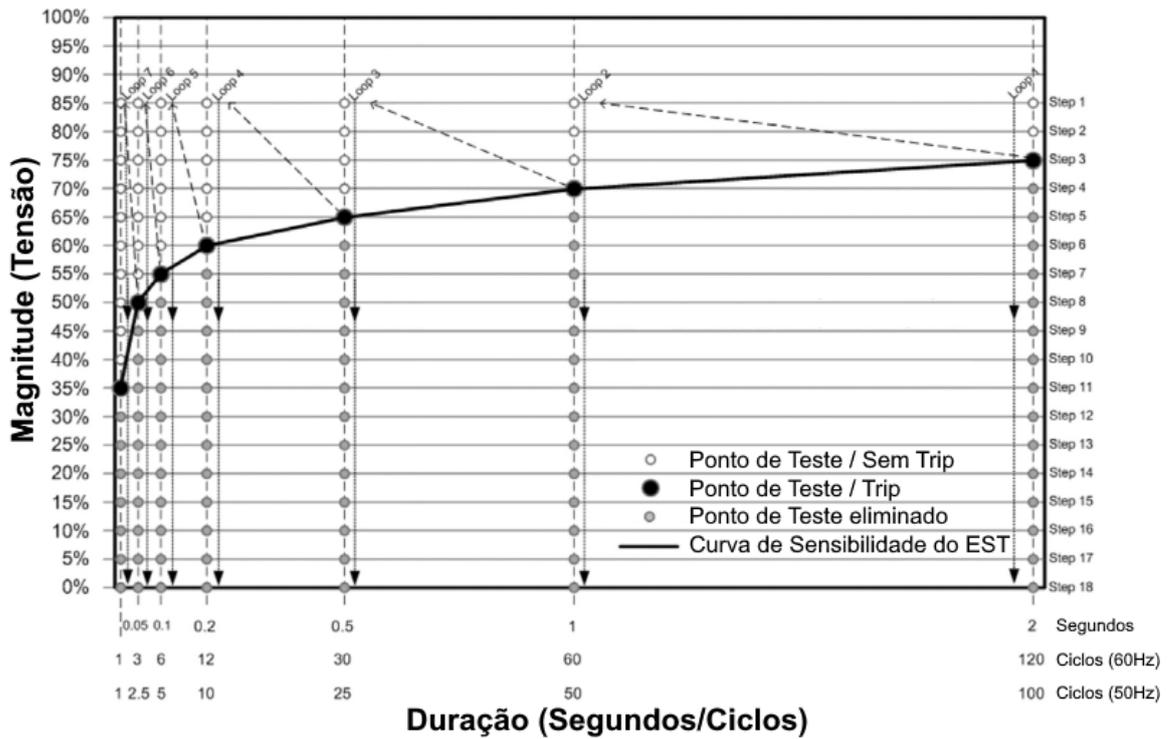


Figura 4.2 – Gráfico do método *Top-Down*.

O método *Box-in* consiste em uma variação do método anterior, onde a duração do próximo laço de teste depende do resultado do laço anterior, permitindo a redução no número de pontos de teste e sua curva explicativa pode ser vista na Figura 4.3.

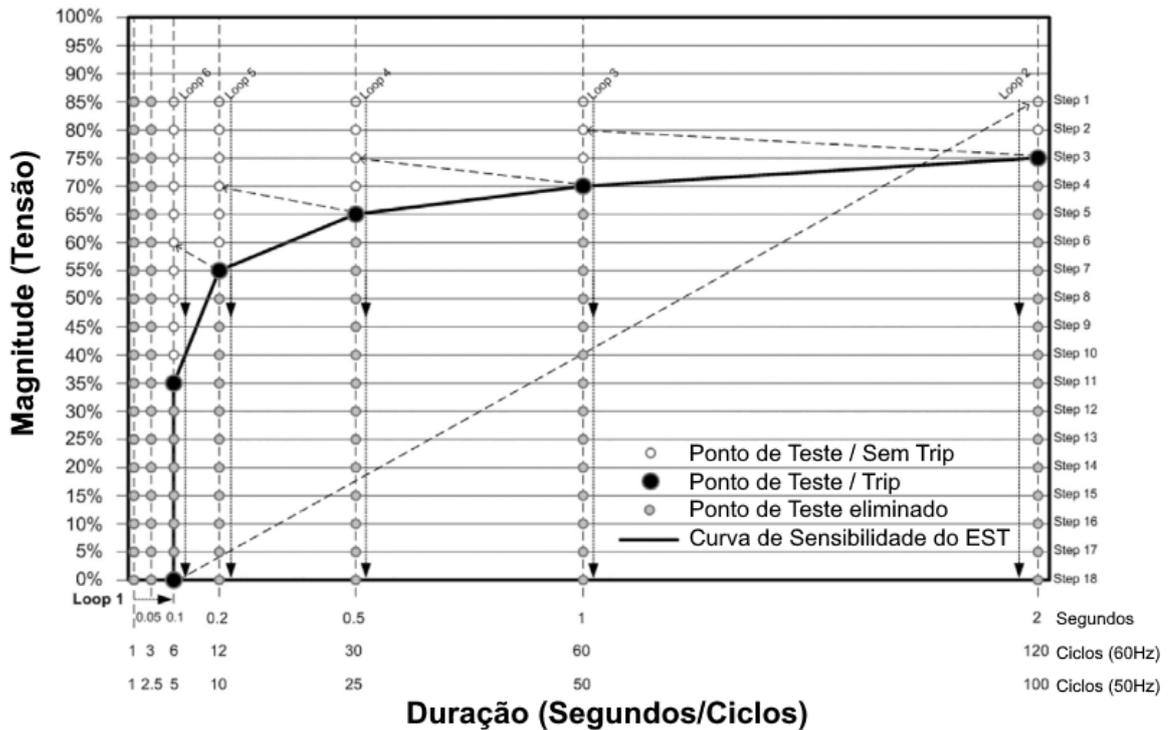


Figura 4.3 – Gráfico do método *Box-In*.

Para melhor precisão de resultados, pode-se adicionar laços de duração diferentes ao teste, de acordo com o equipamento testado.

#### 4.4.2 Left-Right

O método *Left-Right* [12] mantém uma magnitude fixa para o laço de teste, e o equipamento é submetido a AMTs de diferentes durações. Conforme o próprio nome indica, é feito aumento gradativo da duração do AMT, ou seja, os pontos testados são da esquerda para a direita. O fluxograma desse método pode ser visto na Figura 4.5 e a curva de exemplo na Figura 4.4. Assim como nos métodos anteriores, pode-se acrescentar mais durações aos parâmetros de teste, de modo a obter melhor precisão da curva de sensibilidade.

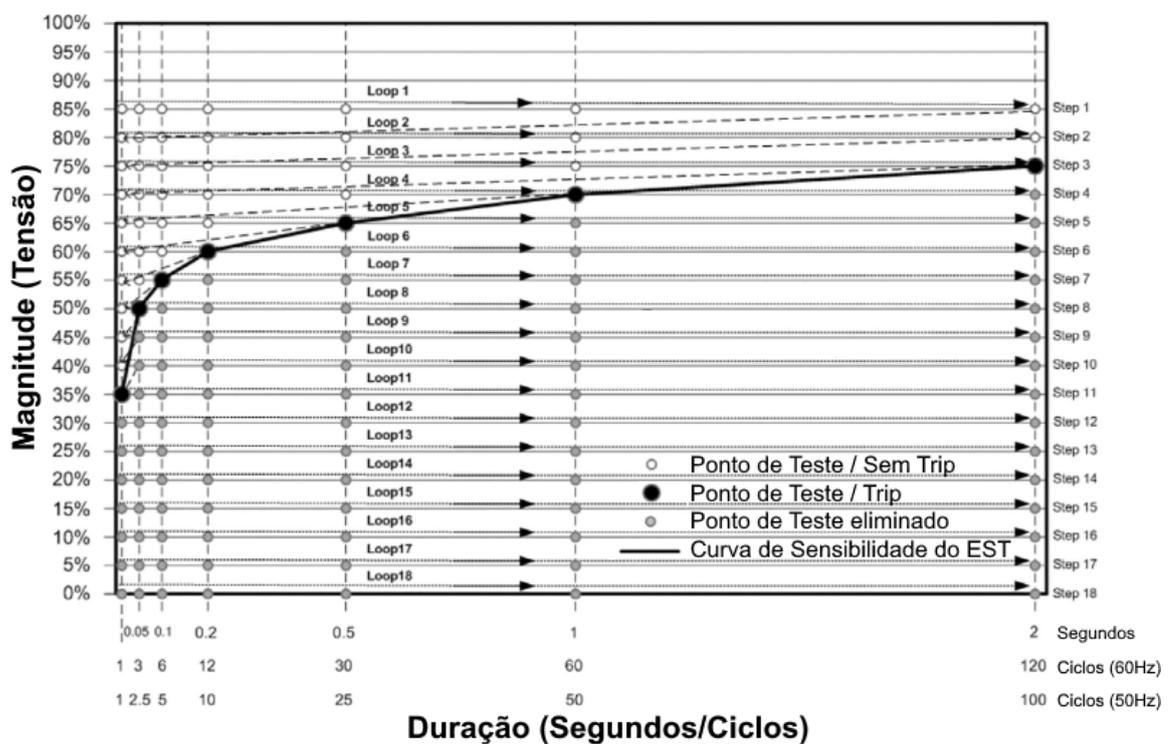
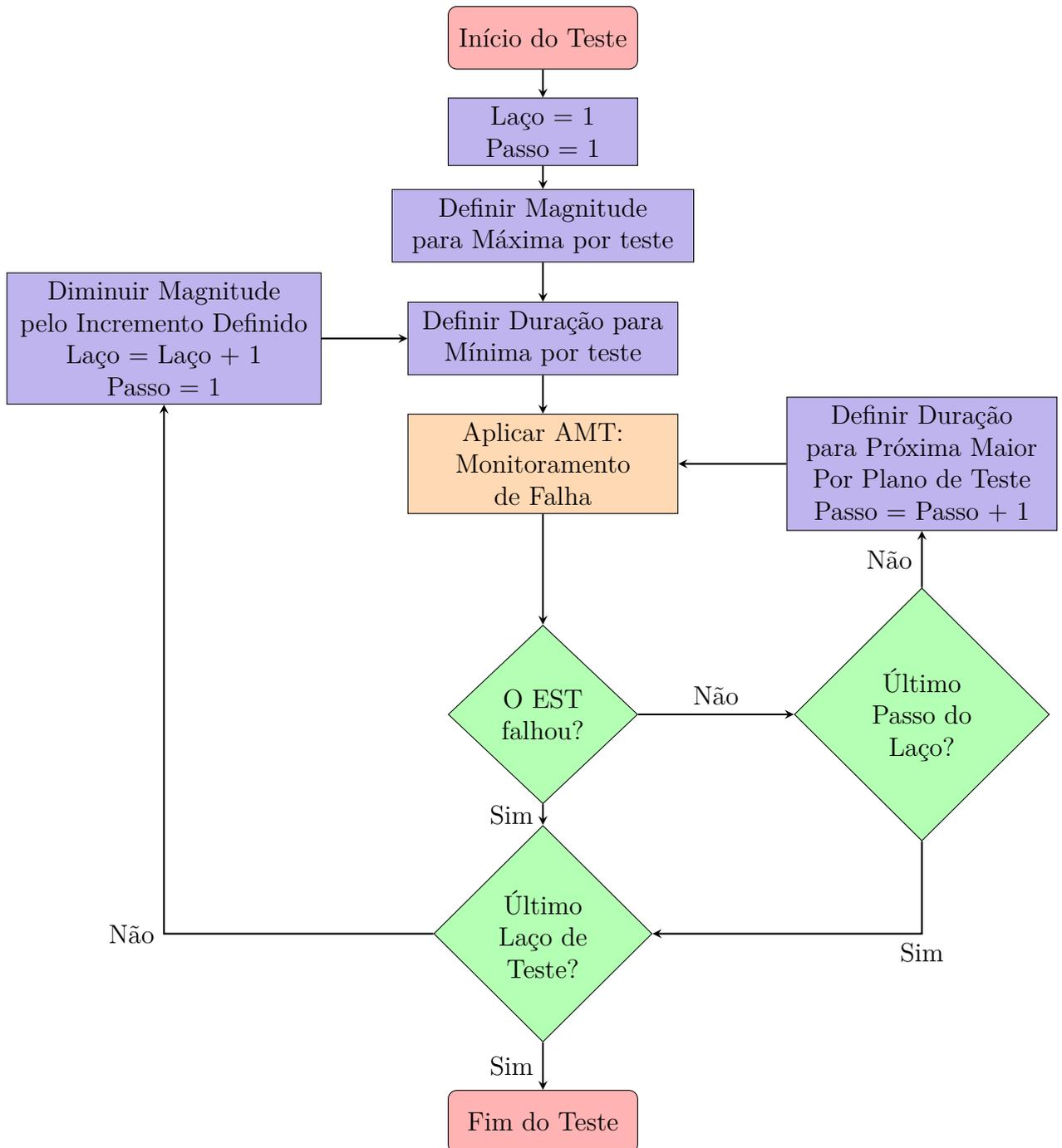


Figura 4.4 – Gráfico do método *Left-Right*.

Figura 4.5 – Fluxograma para o método *Left-Right*.

## 4.5 Ponto-a-ponto

O método ponto-a-ponto é um método genérico utilizado na literatura técnica, de forma a aferir todos os pontos da curva de sensibilidade. Os parâmetros de testes utilizam diferentes passos de magnitude, como 1%, e diferentes passos de duração do AMT, geralmente em milissegundos.

## 4.6 Dicotomia

O método da dicotomia (cortar na metade) apresenta uma nova proposta frente aos métodos já abordados anteriormente, visando de um lado obter precisão na curva de testes, de outro minimizar o número de testes aplicados ao equipamento. Neste método, aplica-se, para determinado nível de magnitude do AMT, os dois extremos de duração, e, caso ocorra falha para a duração máxima, segue-se com o próximo teste considerando a metade da duração anterior [33]. Na Figura 4.6, pode-se ver um exemplo de aplicação do método para a magnitude de 85%. Ocorrendo falha no ponto 2, por exemplo, corta-se a duração máxima na metade e segue a aplicação de AMT como no ponto 3, com 1s de duração. Não ocorrendo falha no ponto 2, o teste seguiria para a próxima magnitude a ser testada.

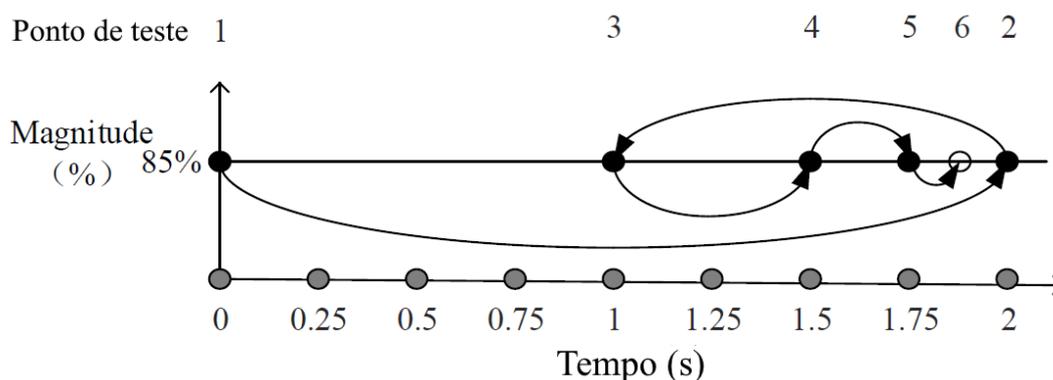


Figura 4.6 – Aplicação do método da dicotomia na magnitude de 85%.

Na Tabela 4.2, adaptada de [33], pode-se ver a comparação entre os métodos em relação ao número de pontos de teste e precisão (erro em duração e em magnitude).

Tabela 4.2 – Comparação dos Métodos de caracterização

Método	Top-down	Left-Right	Box-in	Ponto-a-ponto	Dicotomia
Pontos de teste	70	80	30	2500	450
Erro em duração	50ms	50ms	50ms	5ms	5ms
Erro em magnitude	4%	4%	4%	<1%	<1%

O método da dicotomia propõe alcançar a mesma precisão do teste ponto-a-ponto, porém com quantidade substancialmente reduzida de pontos de teste (redução de 2500 pontos para 450).

## 4.7 Região de Incerteza

As metodologias abordadas anteriormente consideram a aplicação de apenas um AMT para cada ponto da curva de sensibilidade. No entanto, a resposta de um equipamento para um mesmo AMT pode variar, observando-se uma região de incerteza [34], ou seja, a curva de sensibilidade passa a ter um parâmetro extra para avaliação. Na Figura 4.7, adaptada de [34], observa-se a ocorrência de operação normal para o primeiro caso (Onda 1) e de falha para o segundo caso (Onda 2) para o mesmo afundamento aplicado (magnitude e duração).

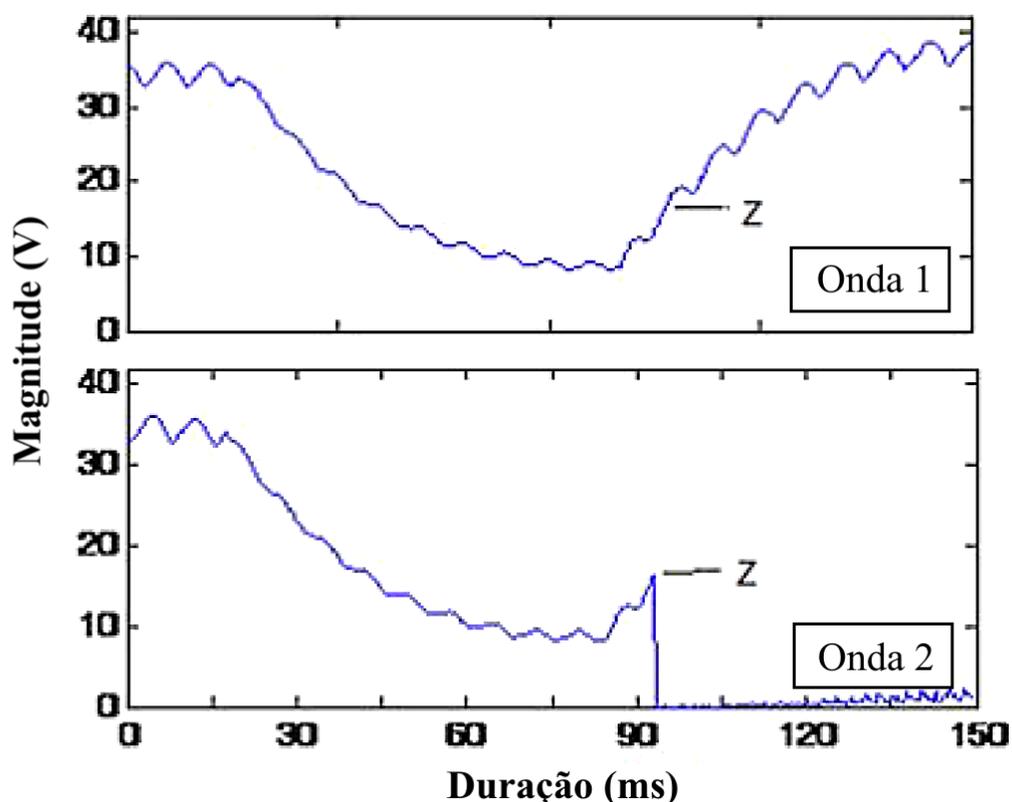


Figura 4.7 – Ocorrência de diferente resultado para mesmo afundamento de tensão aplicado (Z) de 45% de magnitude e 70ms de duração, havendo falha apenas para Onda 2.

Dessa forma, a curva de sensibilidade obtida apresenta-se como na Figura 4.8, onde na região vermelha tem-se a região de avaria/falha do equipamento, e na região laranja, a região de possível falha, podendo o equipamento suportar o AMT ou não. A região branca é caracterizada pela operação normal do equipamento (imunidade).

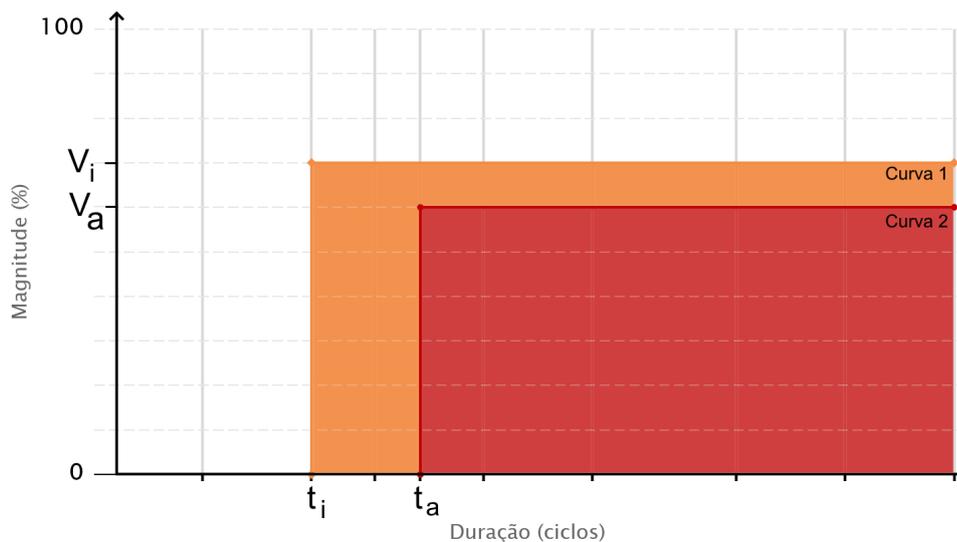


Figura 4.8 – Gráfico de duas curvas, onde a área entre as duas curvas representa a região de incerteza.

## 4.8 Metodologia Utilizada

A metodologia utilizada nos testes deste trabalho de dissertação utiliza os critérios de repetição, como feito em [34], integrando-o ao método de caracterização *Left-Right* da IEEE 1668. Assim, pode-se verificar se há ou não uma região de incerteza na curva de sensibilidade dos equipamentos testados.

O fluxograma do método adaptado pode ser visto na Figura 4.9. Em relação ao método de caracterização *Left-Right*, é acrescentado um laço de repetição ao diagrama, sendo também alterado o critério de avaliação de falha. São feitas 5 repetições do mesmo tipo de afundamento, se ocorrerem 4 ou 5 condições de falha, é considerada uma falha total, mas se ocorrerem de 1 a 3 falhas, considera-se como região de incerteza (critérios estabelecidos pelo autor). É utilizado um intervalo de 10s entre testes, seguindo as especificações recomendadas.

Para a automatização dos testes, foi utilizado o Simulador Digital em Tempo Real - RTDS (*Real-Time Digital Simulator*) - e sua aplicação é descrita no tópico seguinte.

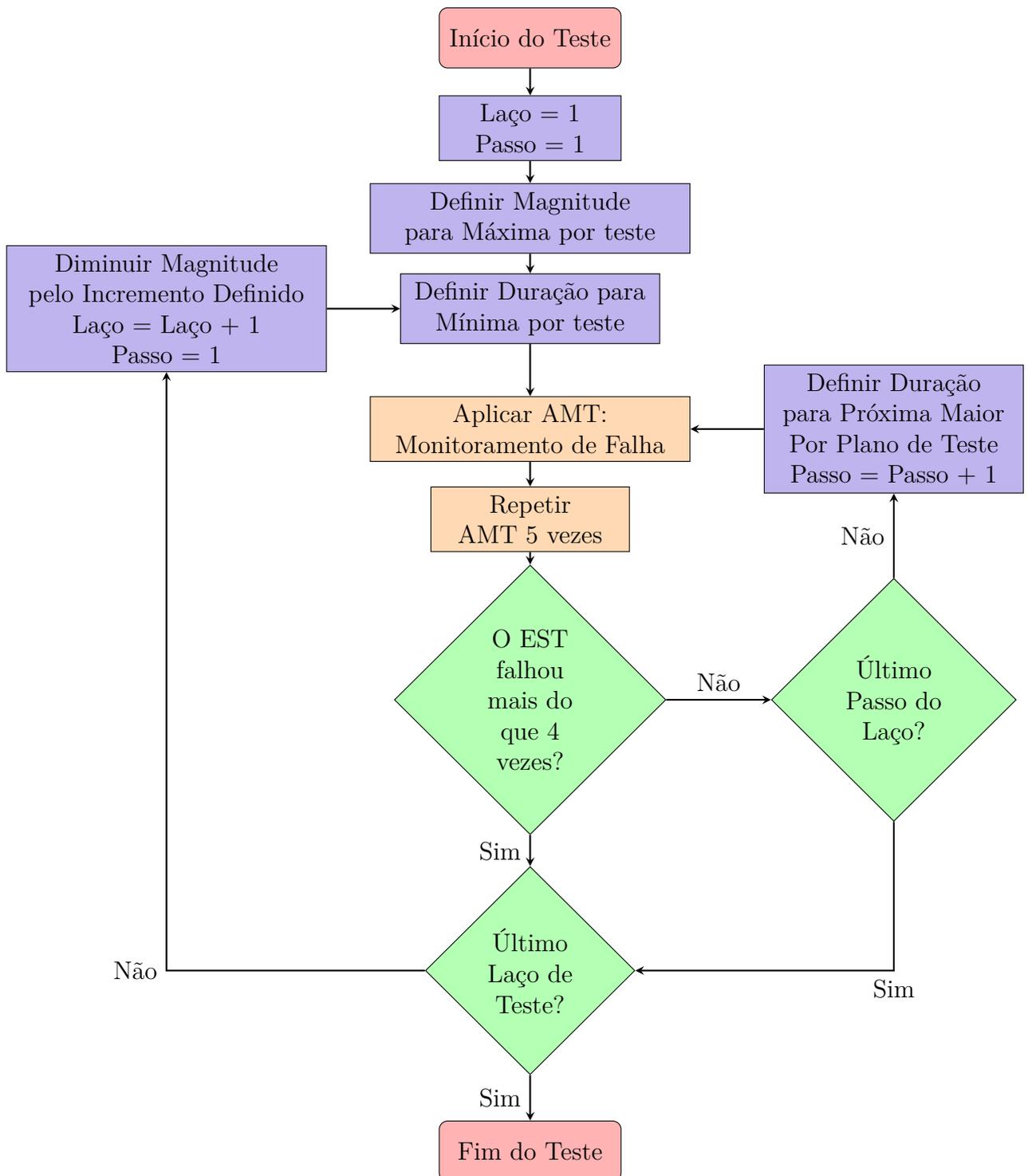


Figura 4.9 – Fluxograma do método adaptado da caracterização Esquerda-Direita (*Left-Right*) com repetições.

#### 4.8.1 Simulador Digital em Tempo Real - RTDS

O RTDS é um equipamento capaz de processar simulações em tempo real, sendo uma de suas principais características a possibilidade de integração de equipamentos reais à simulação, fazendo o chamado *hardware-in-the-loop* (teste em malha fechada), ampla-

mente utilizado para testes de equipamentos de proteção. No Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica (QMAP), por exemplo, já fora utilizado para testes de atuação de relé de proteção [35] bem como de comunicação [36]. O aparelho RTDS disponível no Laboratório de Proteção e Automação de Sistemas Elétricos do QMAP tem sua arquitetura e funcionamento descritos em [37], onde o autor o utiliza para testes de teleproteção.

No caso desta dissertação, faz-se uma extrapolação do uso do RTDS ao direcioná-lo para realização de teste na área de Qualidade da Energia, respeitando-se porém a capacidade de potência da fonte amplificadora de sinais, que atua geralmente como fonte de corrente e tensão para os testes em relés de proteção. Por isso, limita-se os equipamentos testados àqueles de baixa potência.

A montagem da simulação necessária para o teste de afundamento de tensão não requer muito processamento, sendo necessário utilizar apenas um dos quatro *racks* disponíveis. No *Draft* do RSCAD, é montado um circuito para simulação de AMT, e a obtenção dos sinais de resposta dos equipamentos, utilizando-se a placa de saída de sinais analógicos (GTAO). Para a atuação do Controlador Lógico Programável, utilizou-se também a placa de entrada e saída digital (GTFPI) para chaveamento do relé auxiliar. A janela do programa pode ser visualizada na Figura 4.10, que é melhor detalhada no Apêndice A.

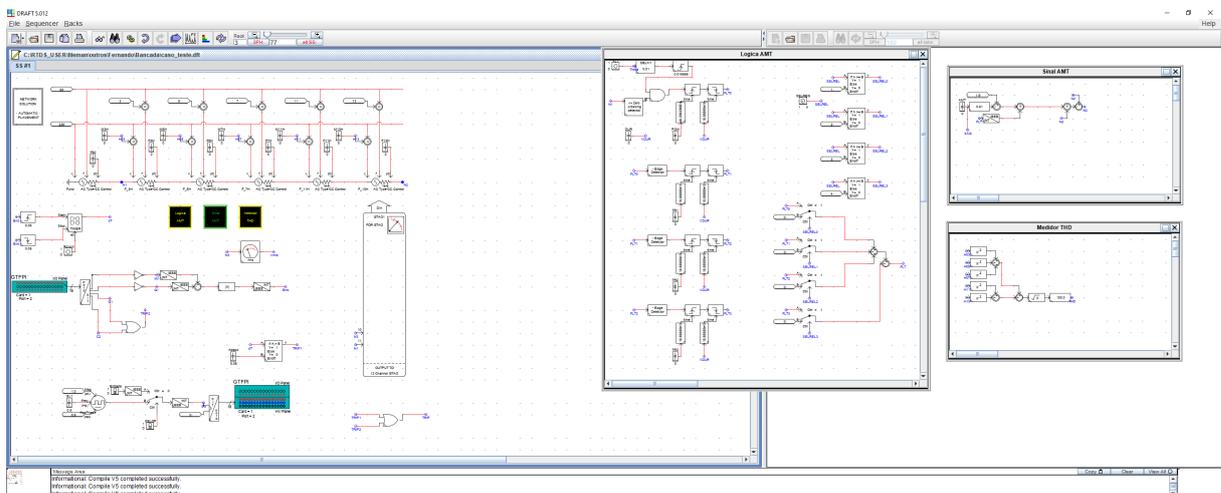


Figura 4.10 – Montagem da simulação no *Draft* do RSCAD.

Após compilada a simulação no *Draft*, pode-se rodá-la pelo *RunTime*, e a aplicação do AMT é feita ao selecionar os valores desejados e apertando um botão (FLT). A tela do *RunTime* pode ser vista na Figura 4.11, e um exemplo de resposta de falha pode ser visto na Figura 4.12.

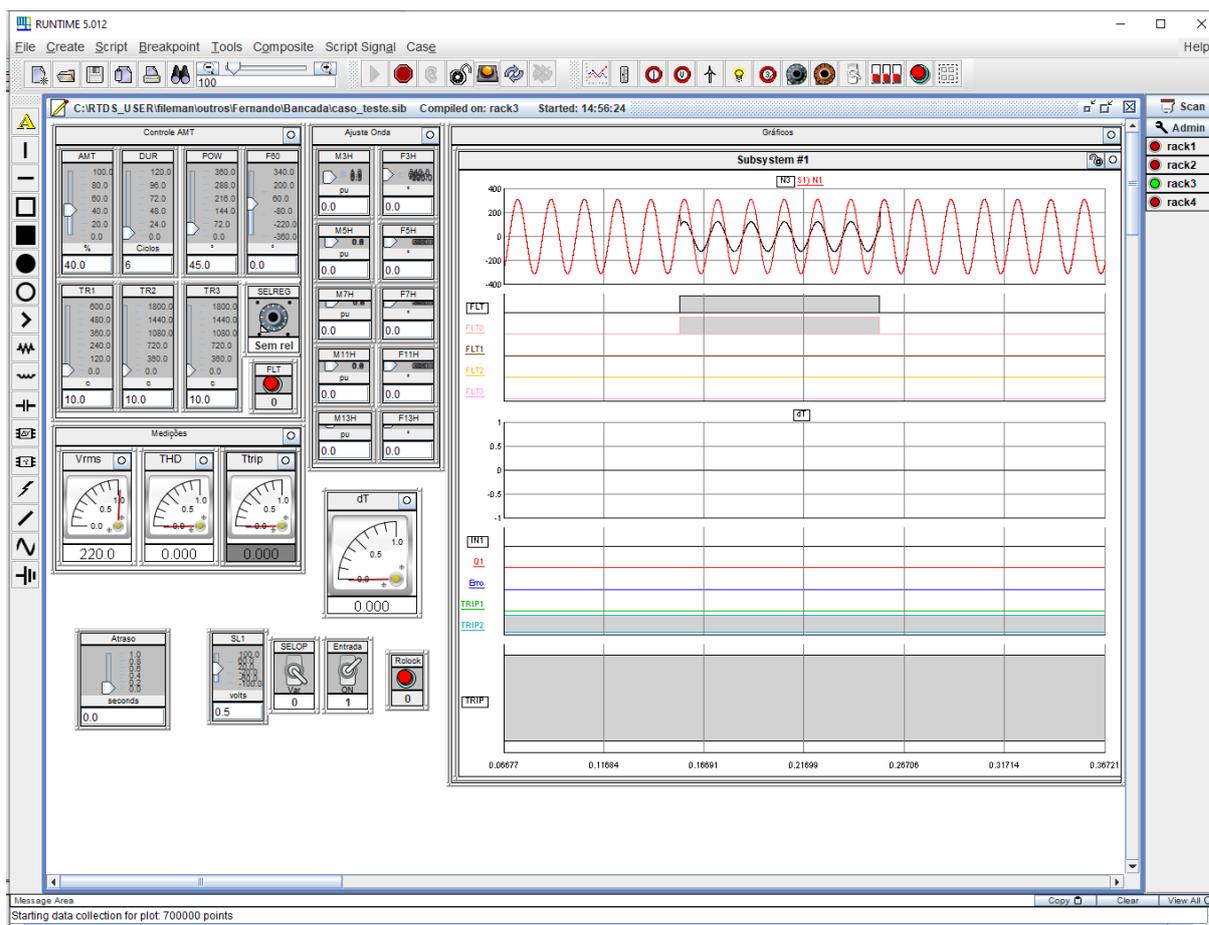


Figura 4.11 – Simulação rodando no *RunTime* do RSCAD.

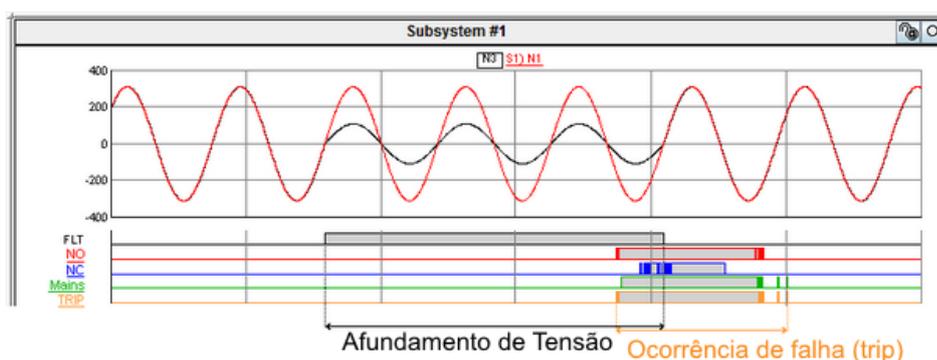


Figura 4.12 – Resposta vista no *RunTime* para falha de equipamento.

Para a automação do teste, faz-se necessário um *script* para a tomada de decisão e mudança nos parâmetros da simulação. De acordo com o resultado do afundamento aplicado no passo anterior, o *script* segue para o próximo laço de magnitude, ou segue para o próximo passo de duração, alterando automaticamente as variáveis desejadas, seguindo as diretrizes do método *Left-Right* com repetições de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.9.

## 4.8.2 Bancada de Testes

A bancada de testes utilizada para os testes laboratoriais incluem os equipamentos listados e pode ser vista na Figura 4.14, sendo seu diagrama de conexões mostrado na Figura 4.13.

- Computador de mesa (*desktop*), com *software* do RTDS (RSCAD) e da Fonte California (cigui32), para aplicar os afundamentos seguindo a metodologia *Left-Right* (IEEE 1668) através de um *script*, obtendo o sinal de resposta do equipamento sob teste pela simulação em *hardware-in-the-loop*;
- Caixa amplificadora Omicron CMS 156, amplificadora trifásica de tensão e corrente (3 x 250 V, 1 x 500 V; 3 x 25 A, 1 x 75 A), que amplifica o baixo sinal de tensão gerado pela placa GTA0 do RTDS para os 220V necessários para os testes;
- Fonte de sinais arbitrários California modelo 6000L com processador 3HGA;
- Qualímetro, 256 amostras por ciclo (Dranetz PX5), para registrar o sinal de tensão aplicado ao equipamento de teste, obtendo a forma de onda dos afundamentos aplicados;
- Equipamento sob teste: contatores (corrente alternada e corrente contínua), fonte chaveada, CLP.

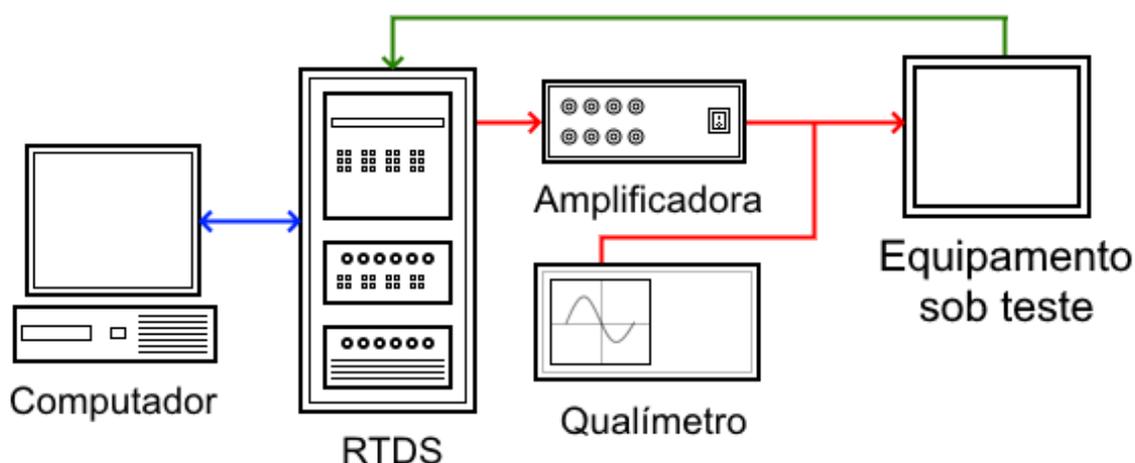


Figura 4.13 – Diagrama de conexões genérico para bancada de testes, mostrando o equipamento sob testes.

As conexões em azul representam comunicação, em vermelho sinal de tensão e em verde, sinal de resposta lógica do equipamento.

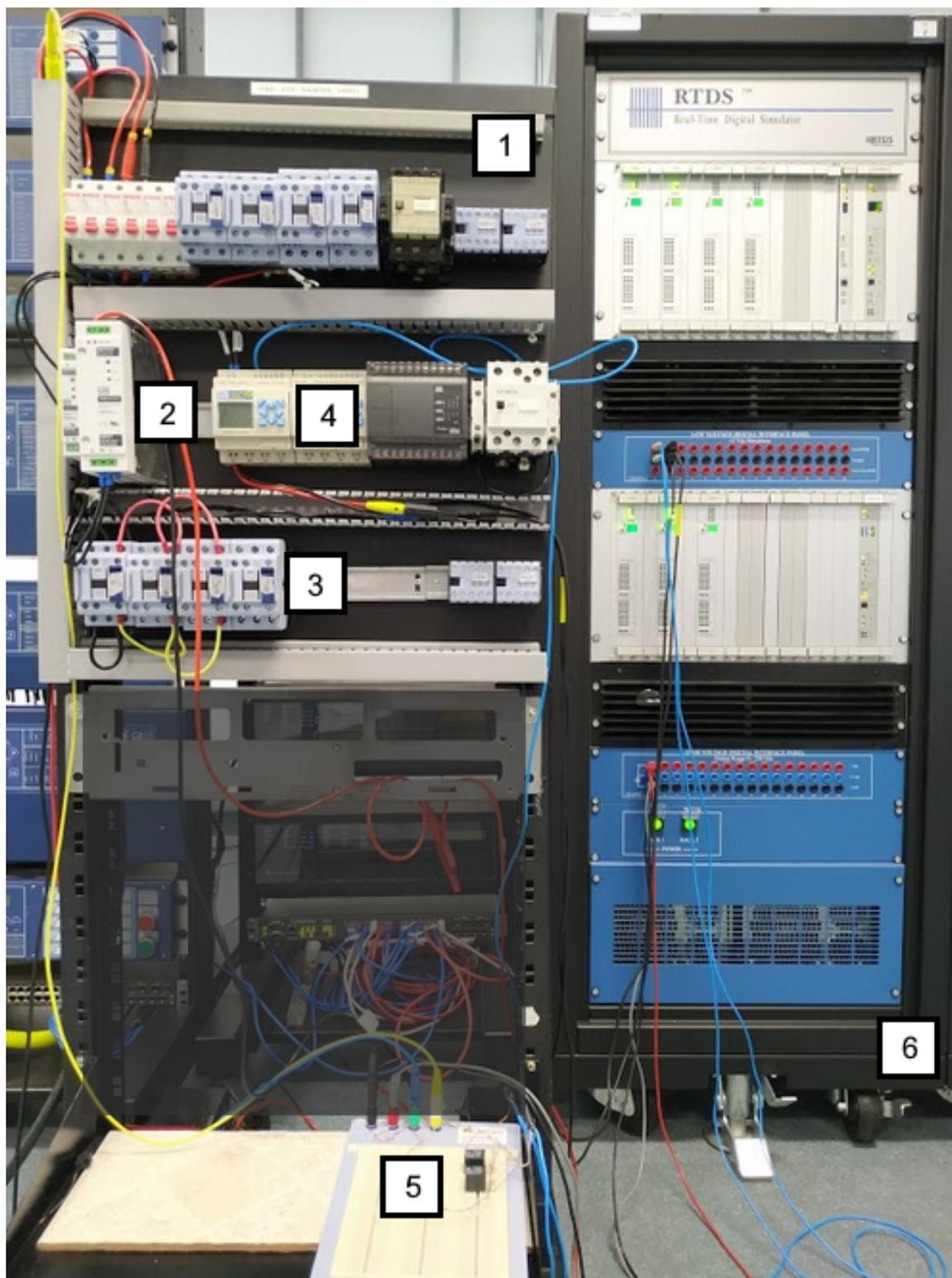


Figura 4.14 – Foto da bancada experimental com rack dos equipamentos testados e RTDS: 1 - contadores c.a.; 2 - fontes c.c.; 3 - contadores c.c.; 4 - CLP; 5 - relé auxiliar; 6 - RTDS.

## 4.9 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia escolhida para a realização dos testes laboratoriais, uma alteração da *Left-Right* proposta pela IEEE1668, com a inserção de repetições, de modo a investigar a zona de incerteza na curva de sensibilidade dos equipamentos, sendo os testes aplicados utilizando-se o RTDS.

Não obstante, foram apresentadas também outras metodologias propostas na literatura técnica, desde variações mais simples, como os testes de aferição de curvas já existentes, incluindo outros métodos como *Top-Down* e *Box-In* e dicotomia. Este último, sendo uma proposta interessante para minimizar o estresse dos equipamentos testados.

# 5 Testes em Equipamentos Industriais Frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão

## 5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as montagens e conexões necessárias para a realização de testes automatizados utilizando o RTDS para cada um dos equipamentos, que foram brevemente abordados na Seção 3.4. São também descritos os critérios de falha além das peculiaridades de cada teste.

Em seguida, os resultados são mostrados e analisados na forma de curvas de sensibilidade individuais, e, ao encerramento de cada seção, de forma agrupada.

Por fim, é apresentado o resultado da bancada industrial, sendo feita a comparação com o agrupamento das curvas de sensibilidade dos componentes utilizados em sua composição.

## 5.2 Contator CA

O primeiro equipamento testado foi o contator, por sua maior simplicidade de operação dentre os equipamentos industriais selecionados. Foram feitos testes iniciais manualmente antes de ser aplicada a metodologia descrita na Seção 4.8. O detalhamento de como foram feitos os testes são apresentados nas sub-seções seguintes.

### 5.2.1 Montagem da bancada

As conexões utilizadas para conectar o contator ao RTDS e demais equipamentos são mostrados na Figura 5.1. O RTDS envia o sinal de baixa tensão para a amplificadora, que então fornece a tensão 220V para o equipamento sob teste, que é também registrada no qualímetro. A resposta do contator é lida pelo RTDS, e a interface é feita pelo Computador *desktop*, que comunica com o RTDS.

De forma a simplificar as conexões dos equipamentos, foram feitas conexões entre contatos principais e auxiliares, como mostra a Figura 5.2. A conexão dos contatos principais é feita em todos os contadores, e as dos auxiliares quando necessário, já que alguns modelos apresentam apenas um par de cada tipo de contato auxiliar. A resposta então lida pelo RTDS é de 3 sinais lógicos, que são então somados com uma porta OU. Antes disso, no entanto, aplica-se a operação lógica de negação (NOT) para o caso dos contatos

normalmente fechados (NF), de modo ao seu comportamento ser lido como o dos outros contatos. Assim, é monitorada a resposta aos AMTs pelo *RunTime* do RSCAD.

Em relação aos critérios de falha adotados, para o caso dos contatores, utilizou-se apenas o de passar no teste - nada acontece com o equipamento - e o de falha - ocorre abertura indevida dos contatos. O caso para recuperação assistida, não é observado para este caso.

Os contatores são mantidos fixados em um trilho DIN, na vertical, como numa instalação normal, em painel (como pode ser visto na Figura 4.14). Não foi aplicada carga aos contatos, visto que são monitorados pelo painel binário do RTDS. Pode-se, assim, testar os contatores por diversas vezes, sem maior perda de vida-útil do equipamento, o que ocorreria com a abertura dos contatos sobre carga por um elevado número de repetições.

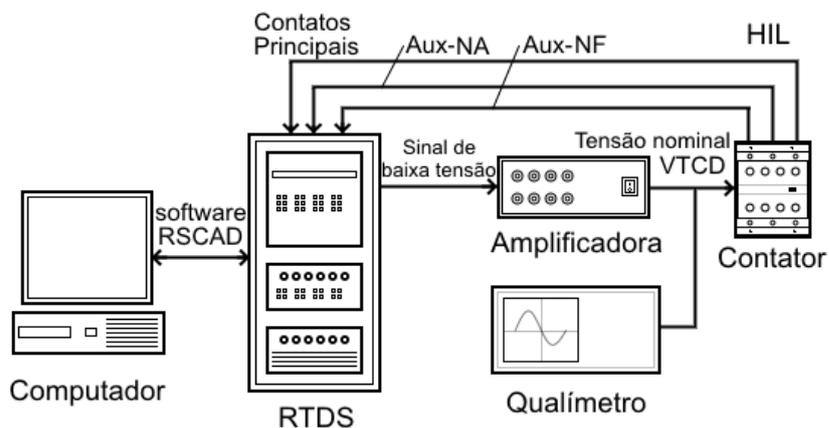


Figura 5.1 – Diagrama de conexões utilizado para testes com contator em corrente alternada.

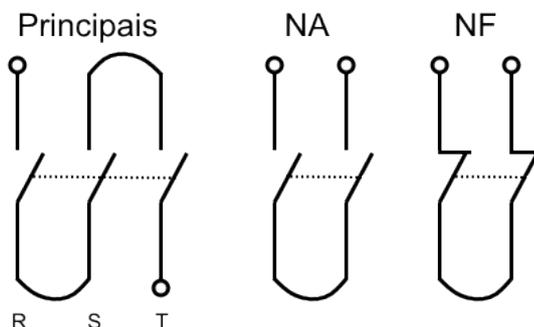


Figura 5.2 – Diagrama de conexões dos contatos.

Os contatores testados são especificados na Tabela 5.1, com as informações sobre potência nominal, número de contatos (de potência e auxiliares) e o tipo de acoplamento

dos contatos auxiliares. Para o caso do modelo E, que é um mini-contator apenas de contatos auxiliares, é deixado em branco o campo de potência nominal.

Tabela 5.1 – Modelos de Contatores Testados

Modelo	Potência Nominal (cv)	Contatos	Acoplamento Auxiliar
A	5,0	3 principais, 2 NA, 2 NF	Frontal. Removível.
B	11,5	3 principais, 2 NA, 2 NF	Lateral. Embutido.
C	3,0	3 principais, 1 NA, 1 NF	Embutido.
D	10,0	3 principais, 1 NA, 1 NF	Embutido.
E	-	2 NA, 2 NF	Nenhum.
F	11,5	3 principais, 2 NA, 2 NF	Lateral. Removível.

## 5.2.2 Resultados

Os resultados obtidos para os seis modelos de contatores testados são apresentados nesta seção. É possível observar semelhanças nos comportamentos dos contatores para diferentes ângulos de incidência, porém, os valores de magnitude e duração variam caso a caso, bem como a faixa de incerteza.

As curvas obtidas para o contator de modelo A são apresentadas nas Figuras 5.3 a 5.6. Ocorre uma pequena região de incerteza próxima à região de falha (área laranja), bem como a presença de alguns pontos fora da curva, em valores acima da magnitude da tensão de *drop-out*, conforme pode ser observado na Figura 5.4.

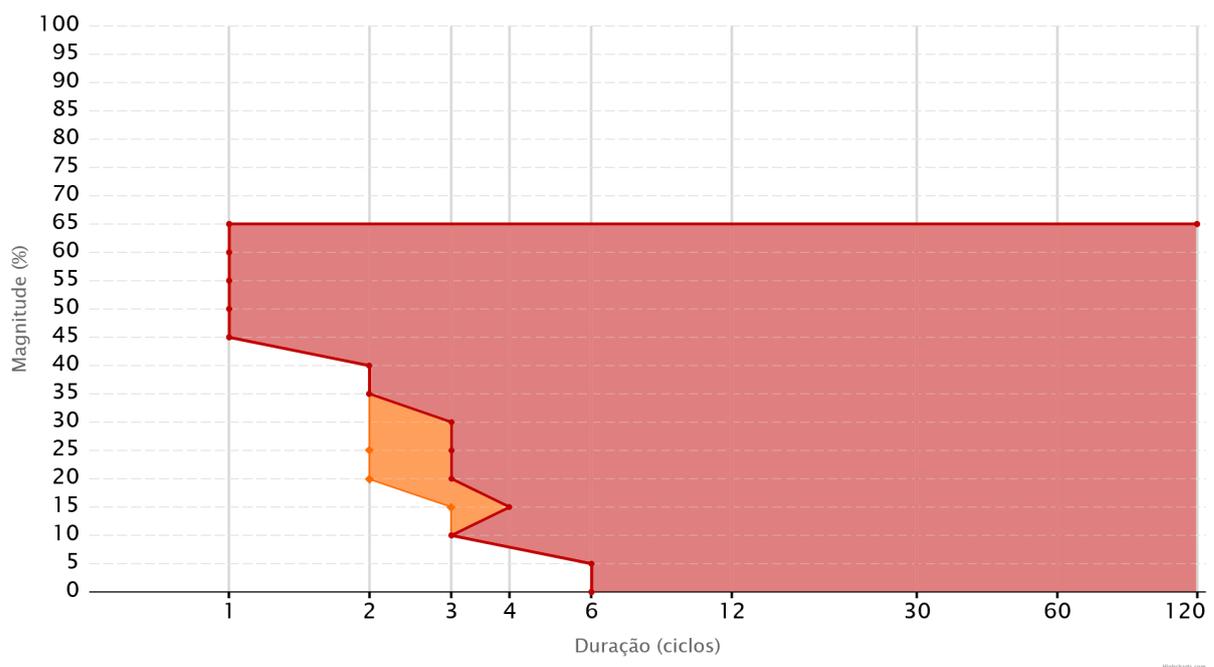


Figura 5.3 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em  $0^\circ$ .

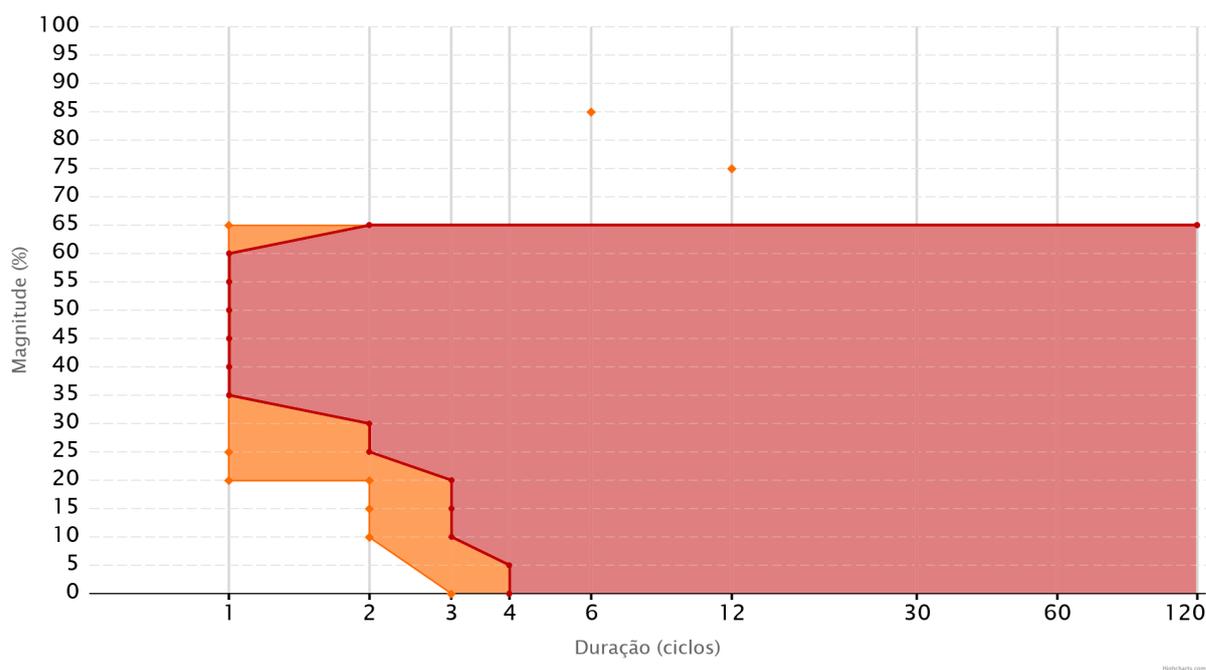


Figura 5.4 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 45°.

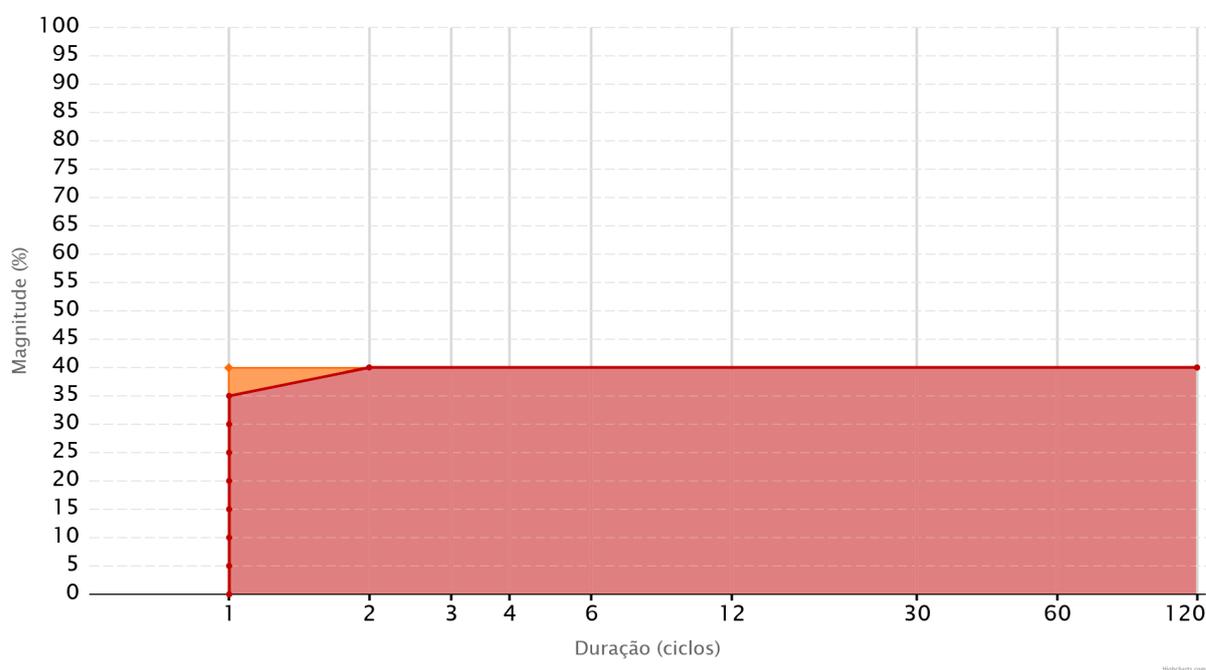


Figura 5.5 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 90°.

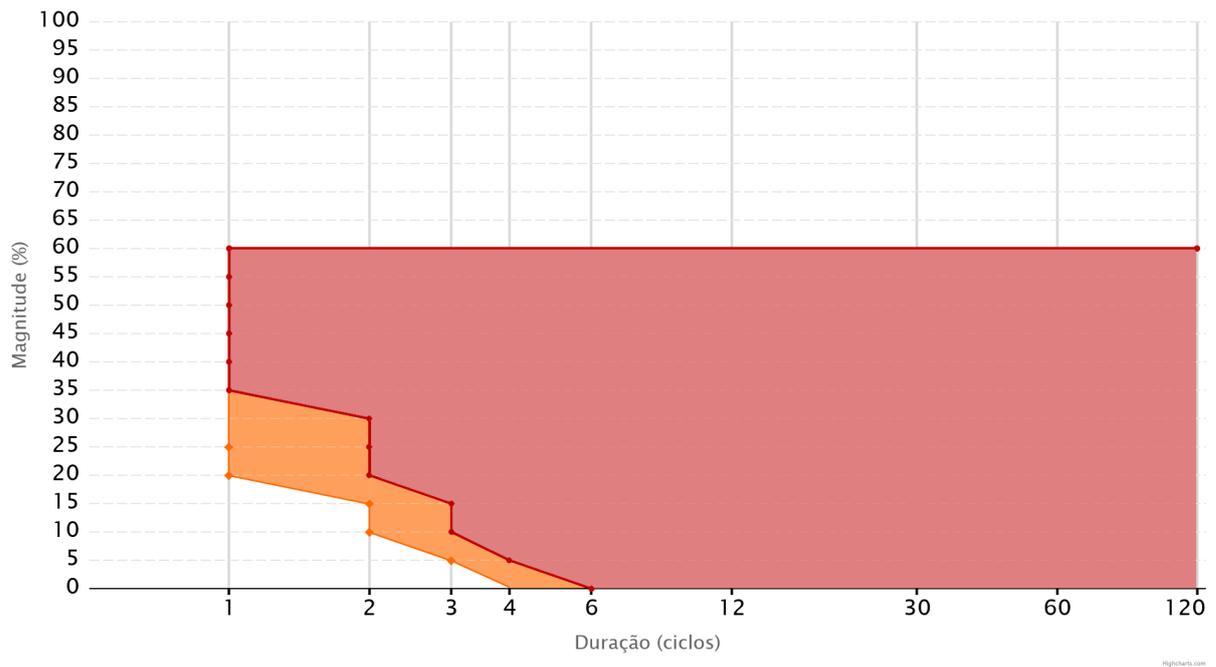


Figura 5.6 – Curva de sensibilidade obtida para o contator A, para ângulo de incidência em 135°.

Para o contator de modelo B, as curvas obtidas são apresentadas nas Figuras de 5.7 a 5.10. Desta vez, ocorre a região de incerteza apenas próxima à região de avaria.

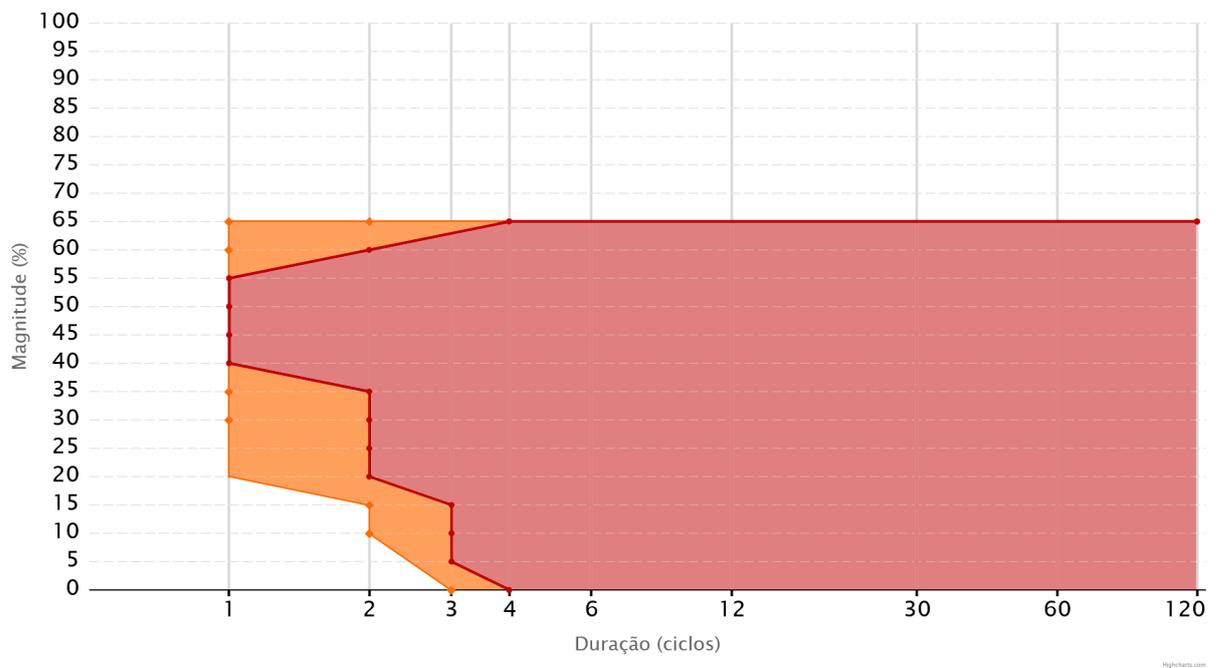


Figura 5.7 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 0°.

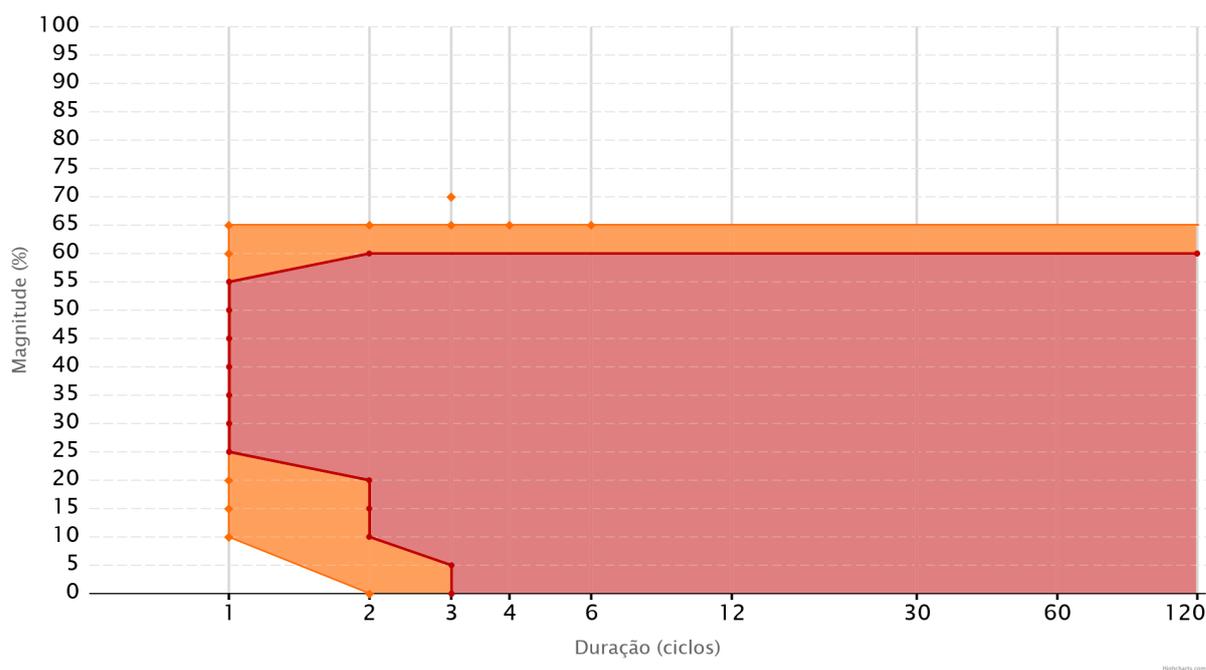


Figura 5.8 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 45°.

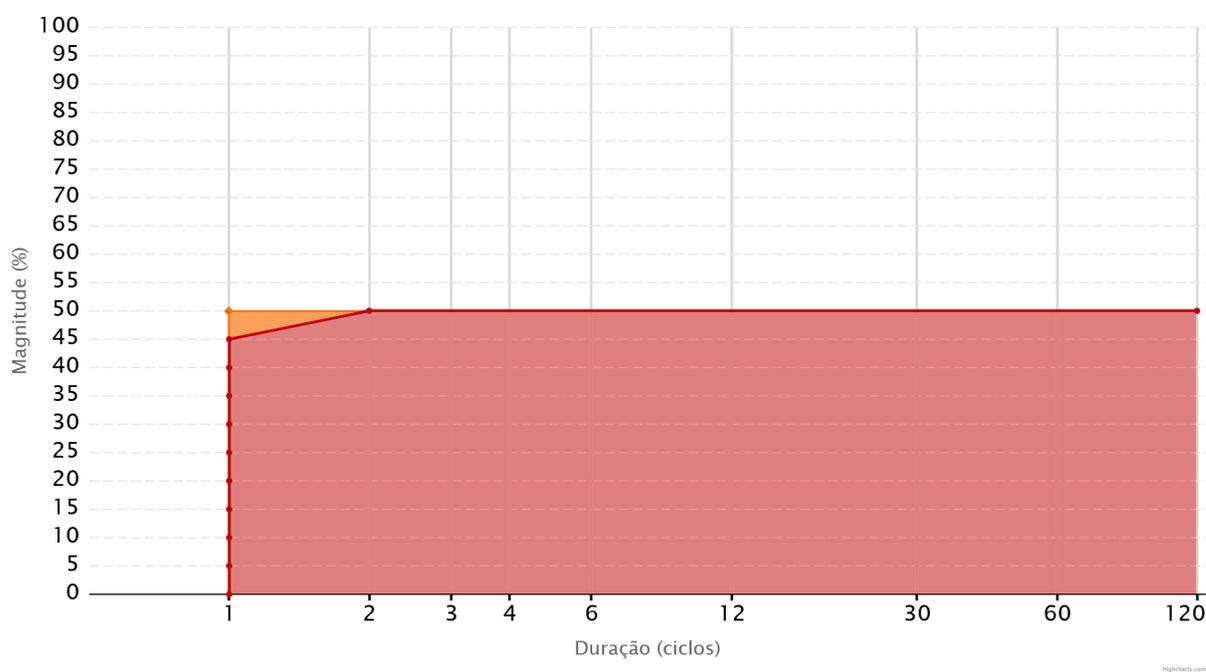


Figura 5.9 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 90°.

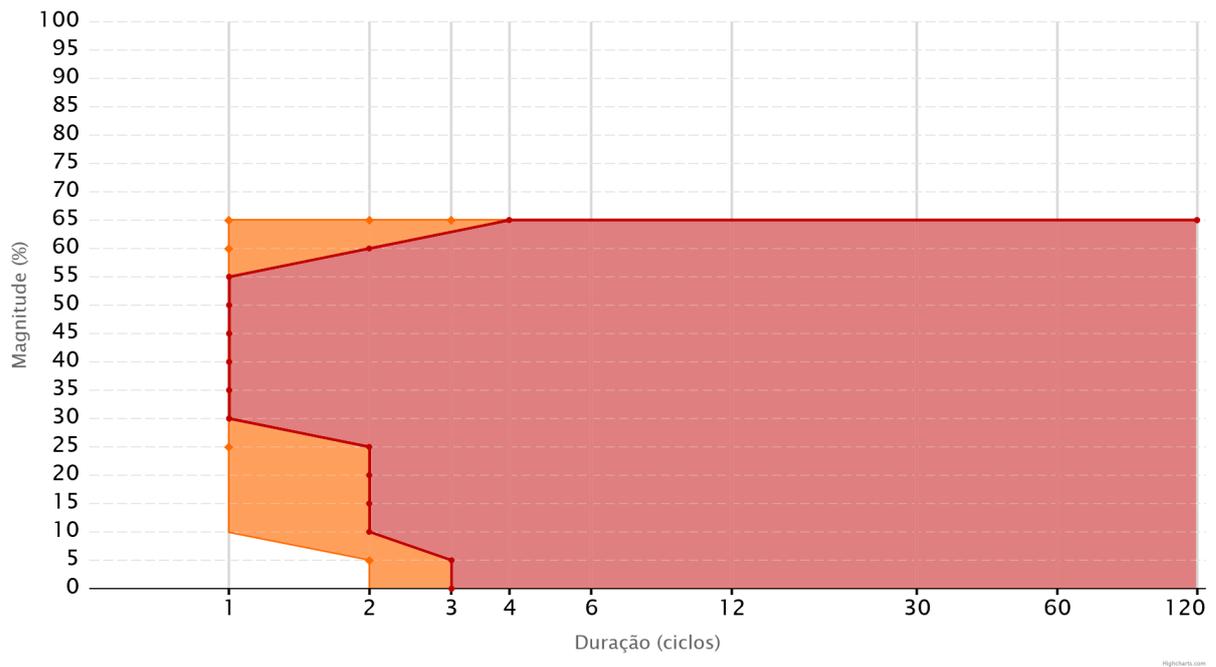


Figura 5.10 – Curva de sensibilidade obtida para o contator B, para ângulo de incidência em 135°.

No caso do modelo C, as curvas são apresentadas nas Figuras de 5.11 a 5.14. Para o caso de ângulo de incidência de 0°, ocorre uma faixa de incerteza para tensão de *drop-out* de 65%. Como nos casos anteriores, a curva de 90° é quase que totalmente retangular, não tendo apresentado ponto de incerteza.

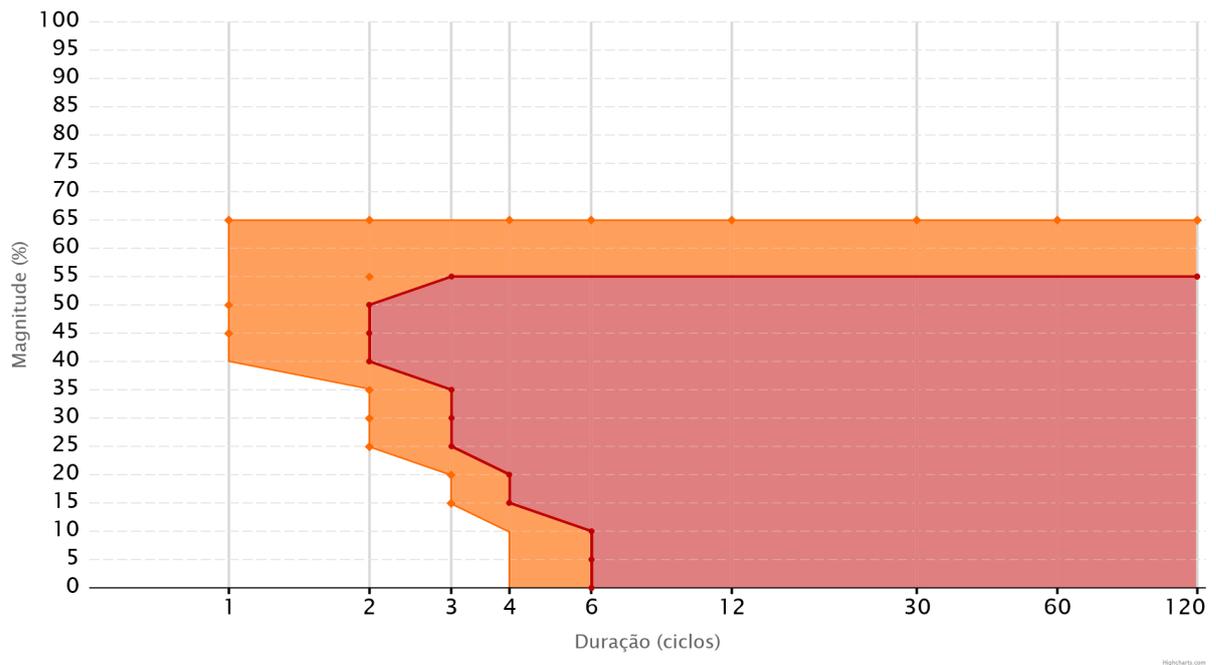


Figura 5.11 – Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 0°.

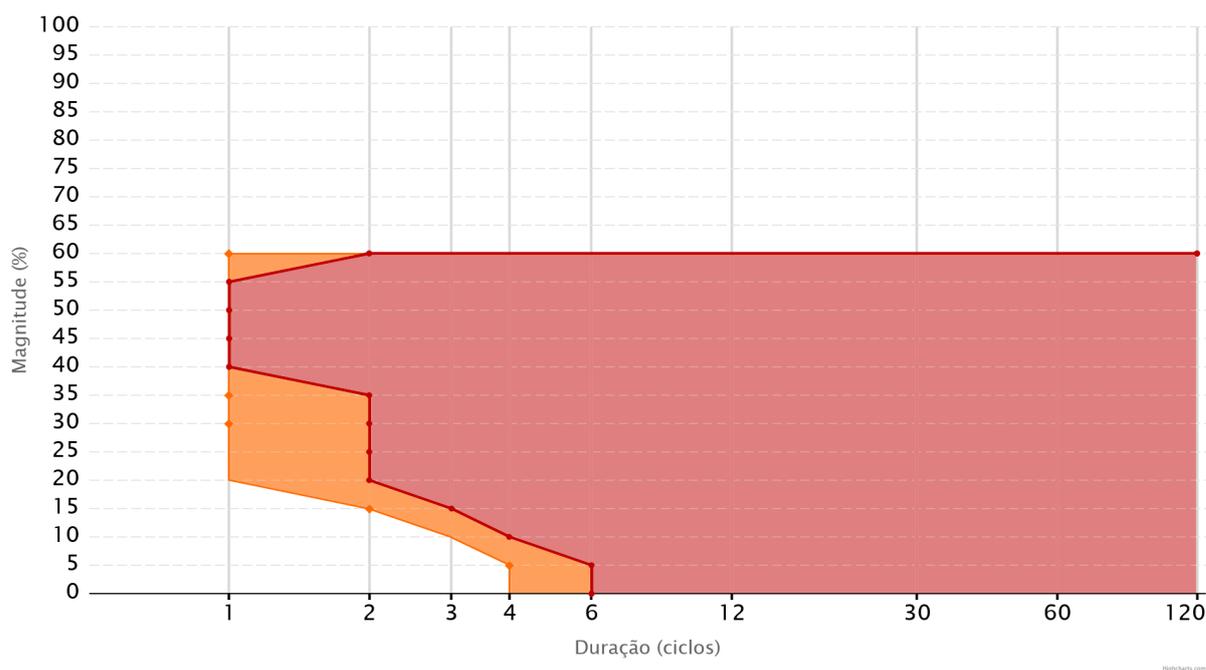


Figura 5.12 – Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 45°.

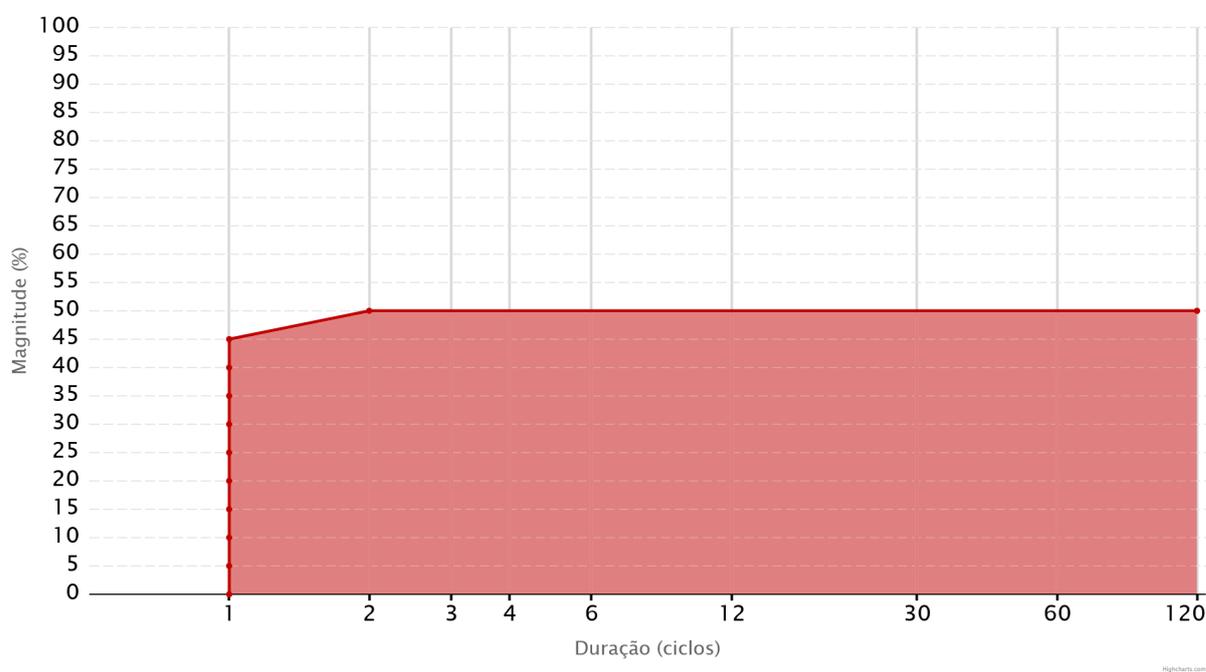


Figura 5.13 – Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 90°.

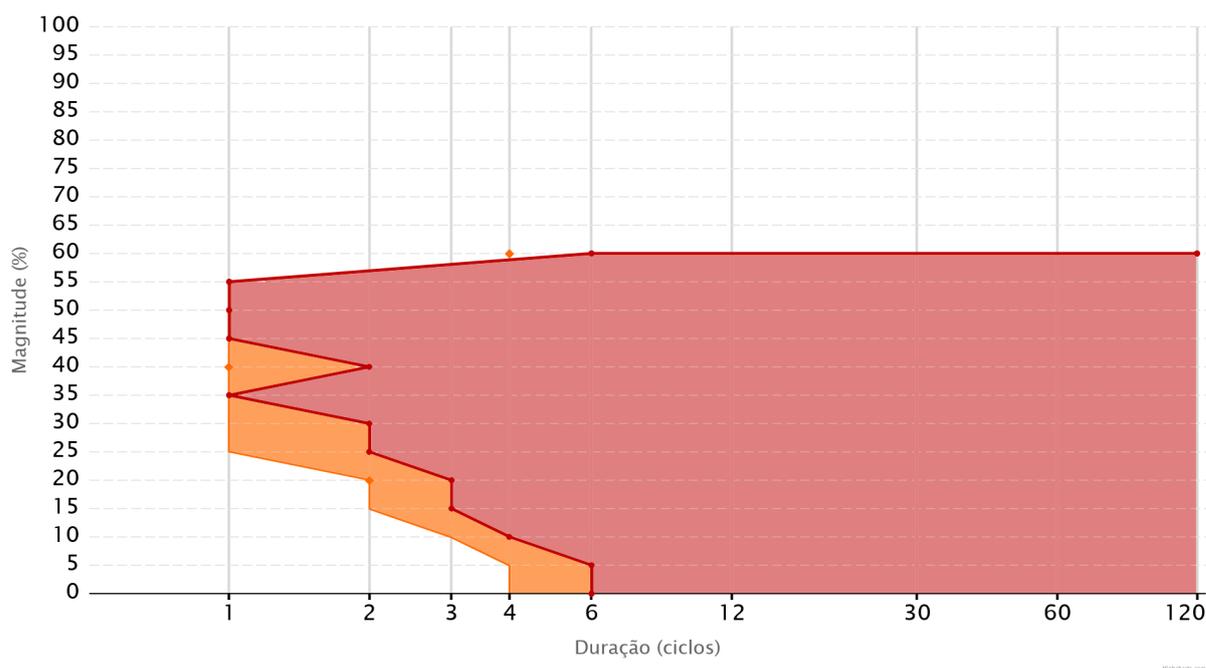


Figura 5.14 – Curva de sensibilidade obtida para o contator C, para ângulo de incidência em 135°.

Para o contator de modelo D, as curvas obtidas são apresentadas nas Figuras de 5.15 a 5.18. Pode-se notar semelhanças nos formatos das curvas de sensibilidade obtidas para os outros modelos já apresentados. Para este caso, ocorre uma faixa de incerteza em 65%, próxima à região de avaria.

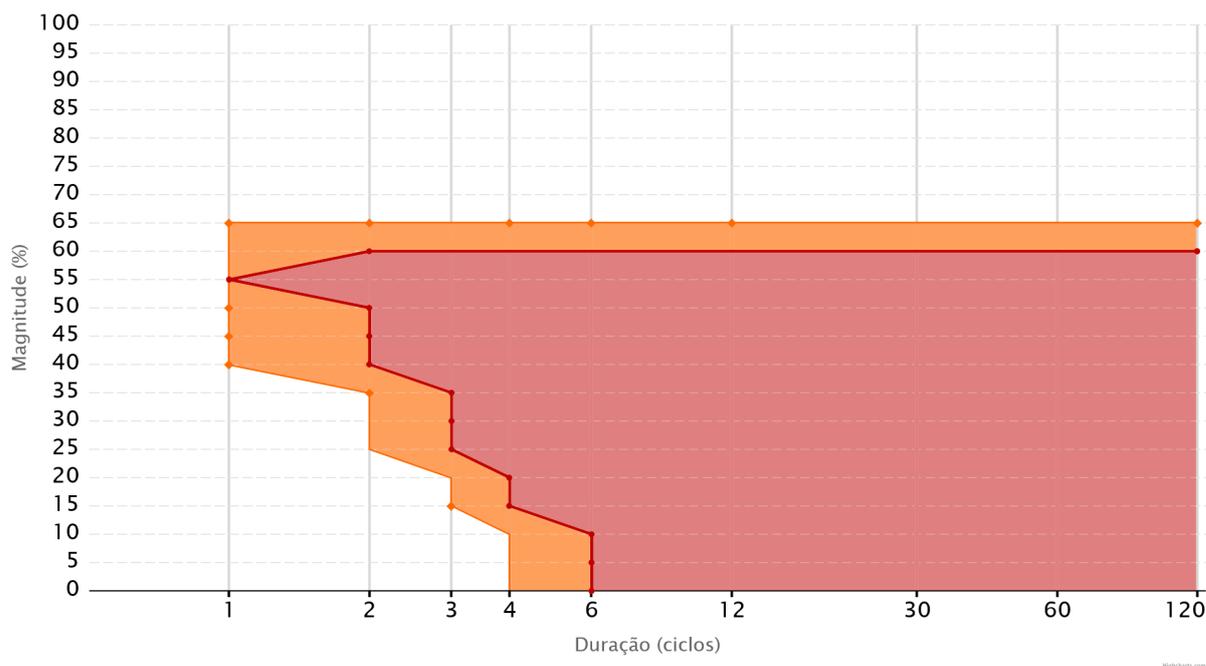


Figura 5.15 – Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 0°.

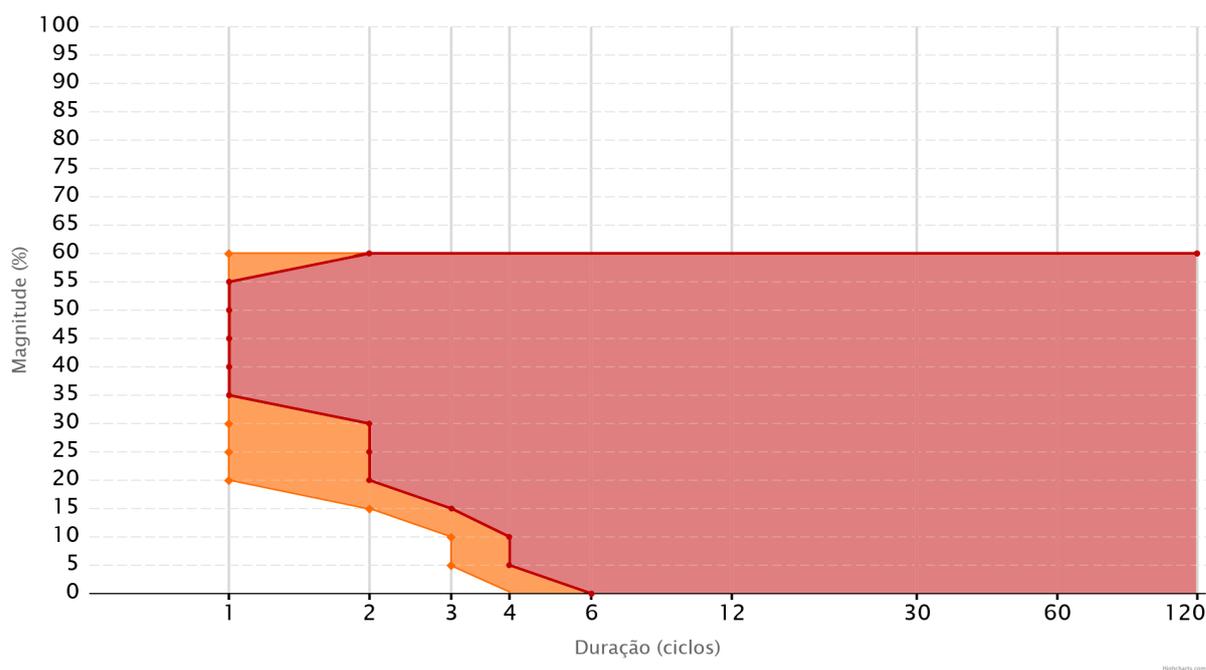


Figura 5.16 – Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 45°.

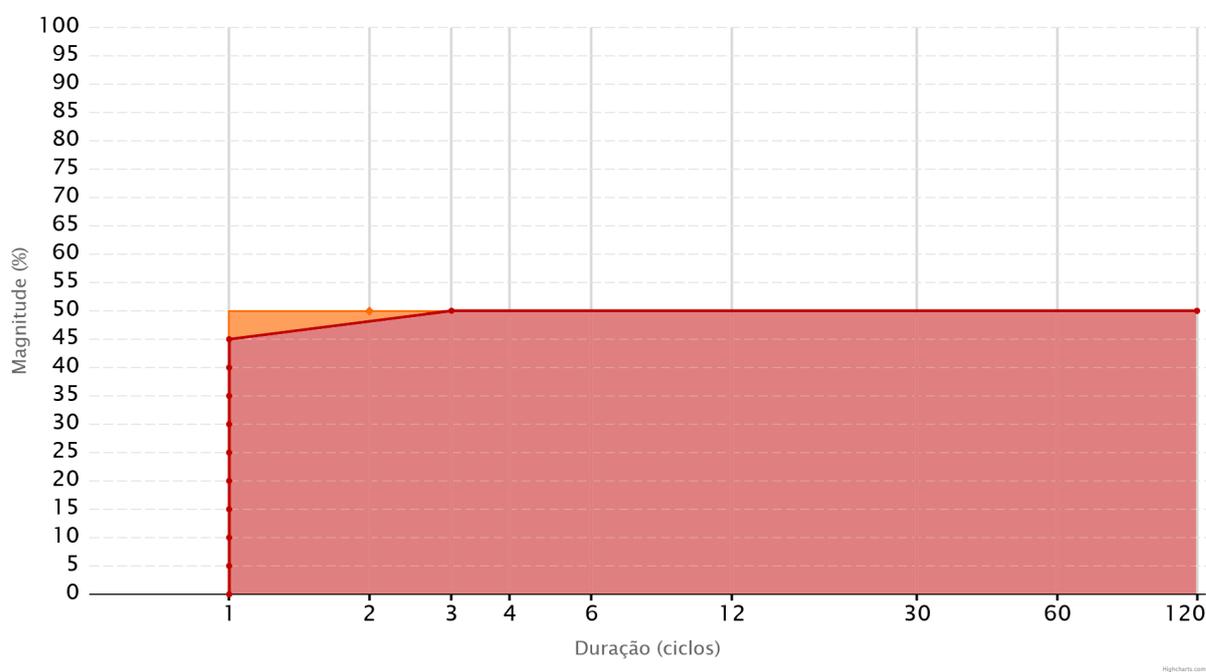


Figura 5.17 – Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 90°.

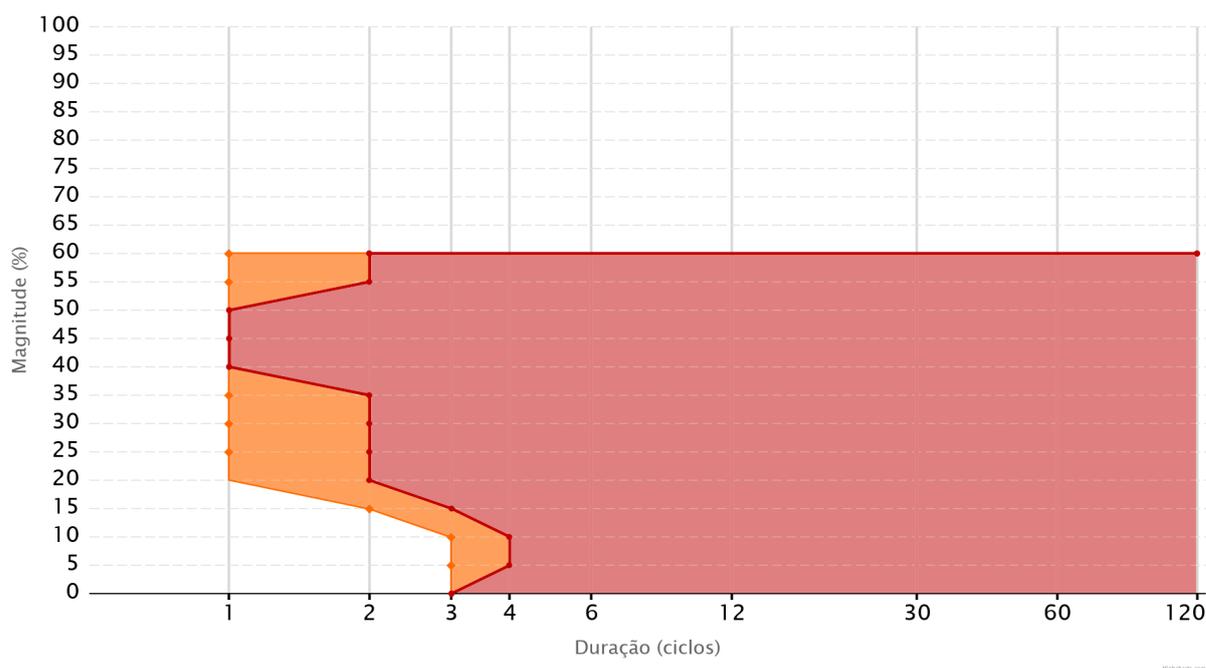


Figura 5.18 – Curva de sensibilidade obtida para o contator D, para ângulo de incidência em 135°.

O minicontator - modelo E - apresenta suportabilidade maior aos AMTs, bem como uma leve diferença no formato de suas curvas, conforme pode ser observado nas Figuras de 5.19 a 5.22. Isso deve-se, provavelmente, a sua menor estrutura contendo apenas contatos auxiliares e sem contatos de potência.

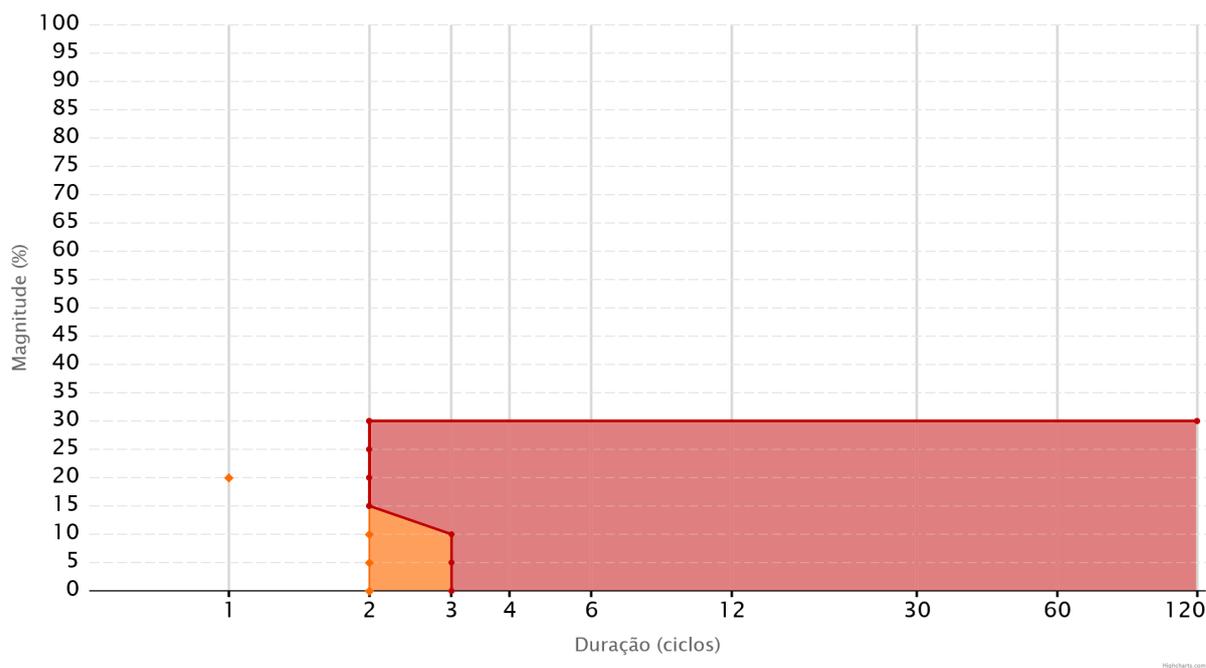


Figura 5.19 – Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 0°.

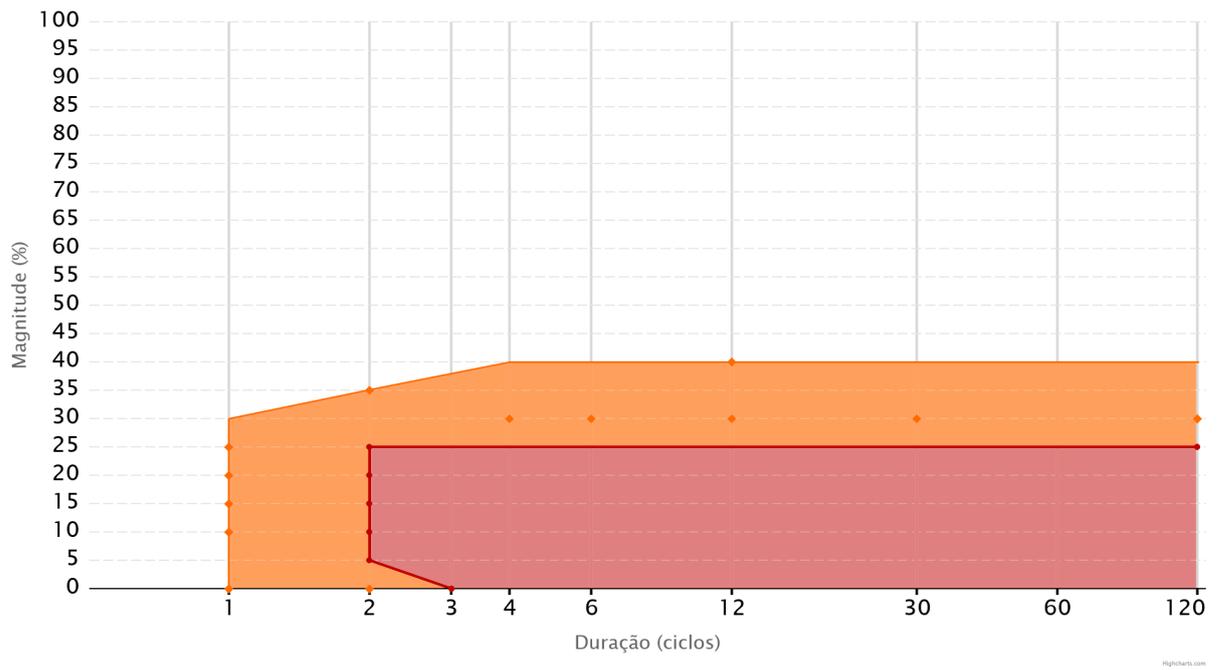


Figura 5.20 – Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 45°.

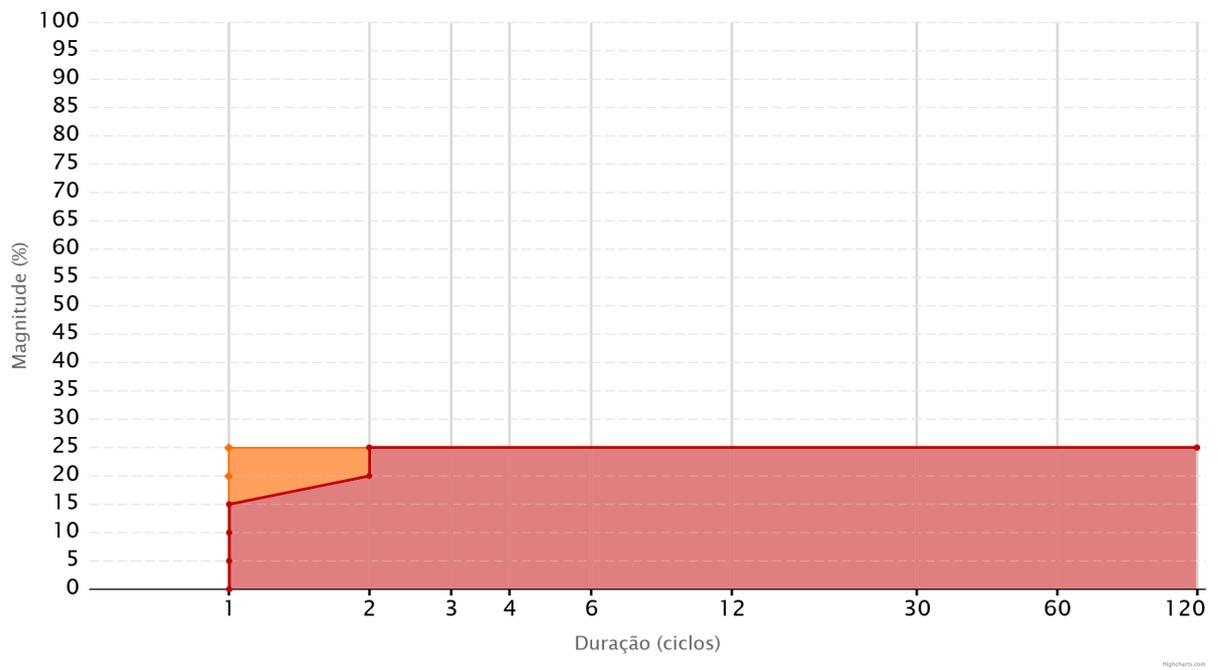


Figura 5.21 – Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 90°.

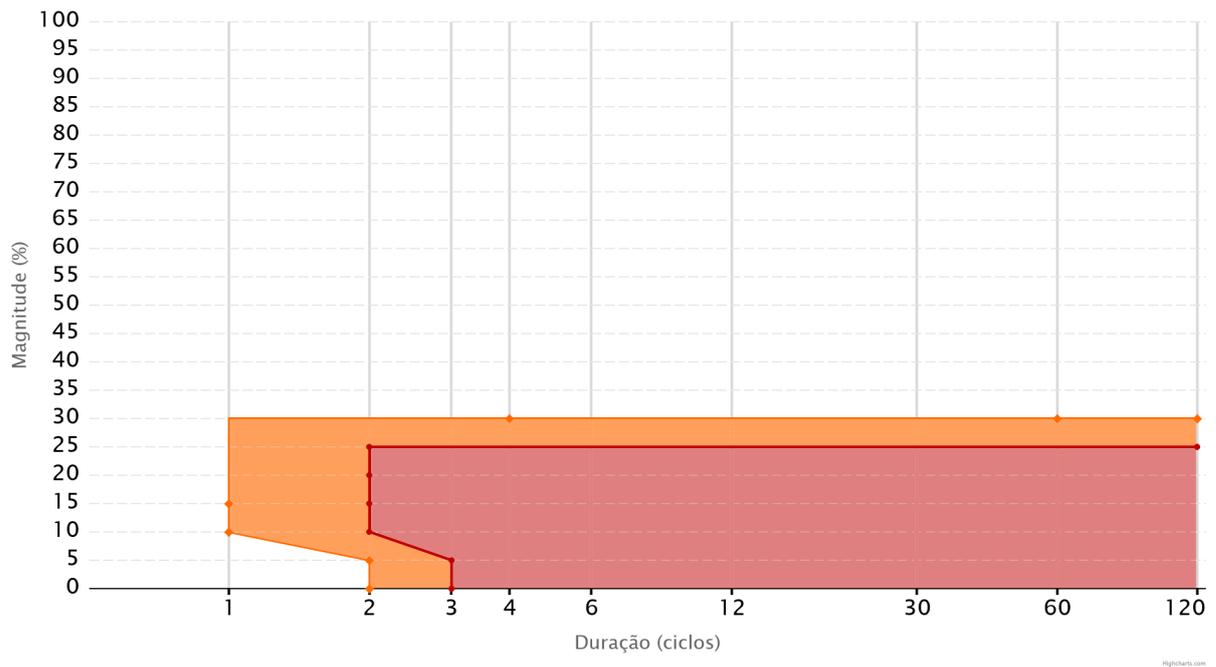


Figura 5.22 – Curva de sensibilidade obtida para o contator E, para ângulo de incidência em 135°.

Já o modelo F, cujas curvas são apresentadas nas Figuras de 5.23 a 5.26, foi o contator que apresentou menor suportabilidade a AMTs, desatracando-se para afundamentos de 70% com ângulo de incidência nulo.

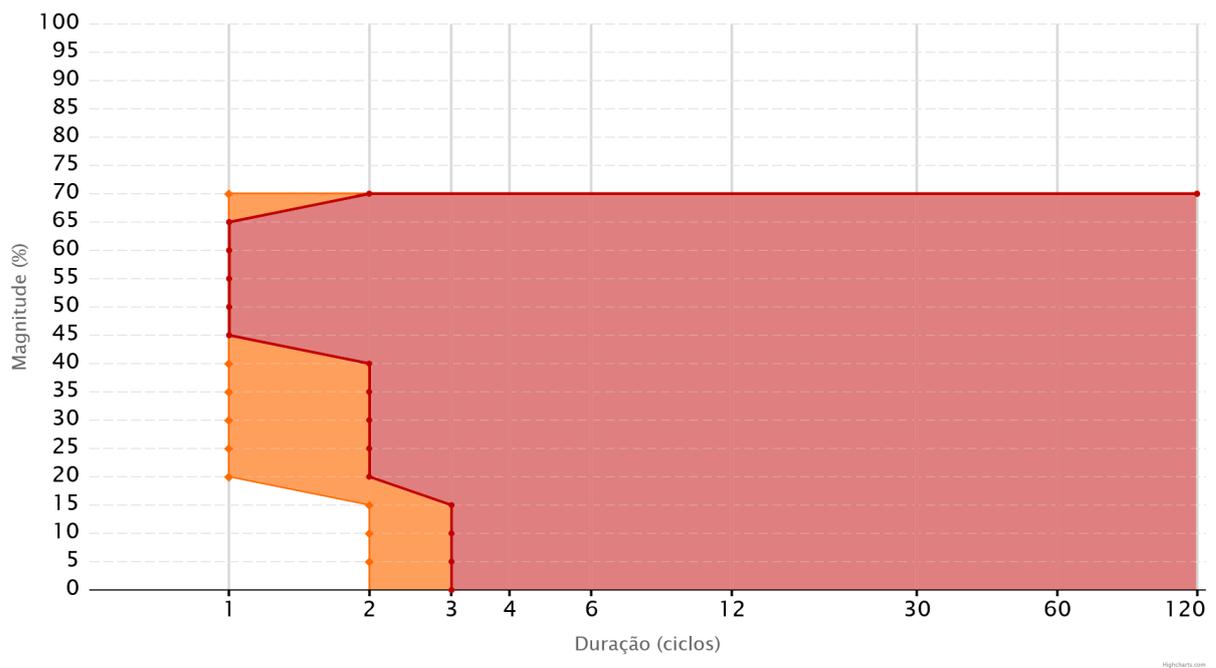


Figura 5.23 – Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 0°.

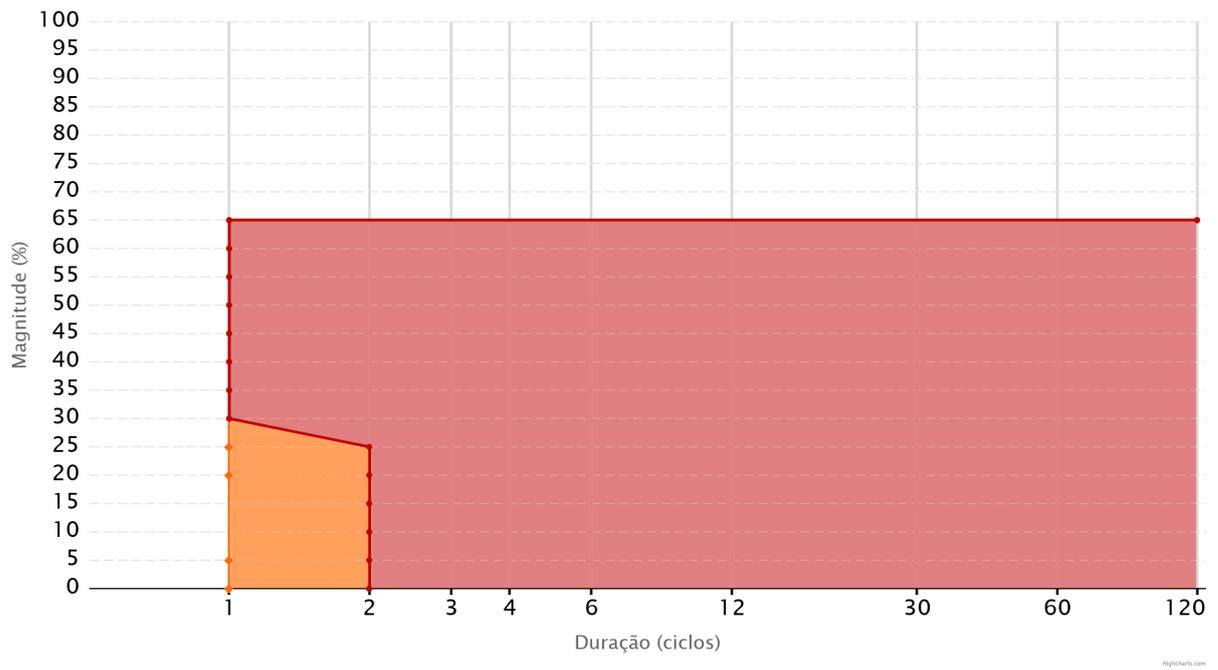


Figura 5.24 – Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 45°.

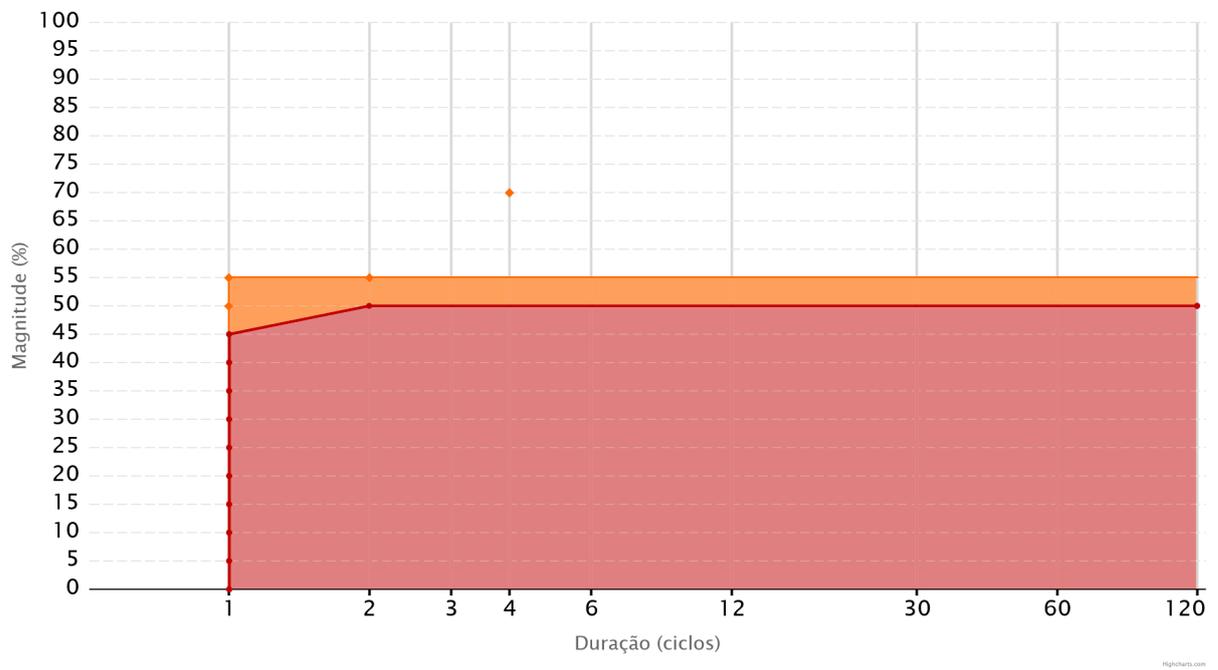


Figura 5.25 – Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 90°.

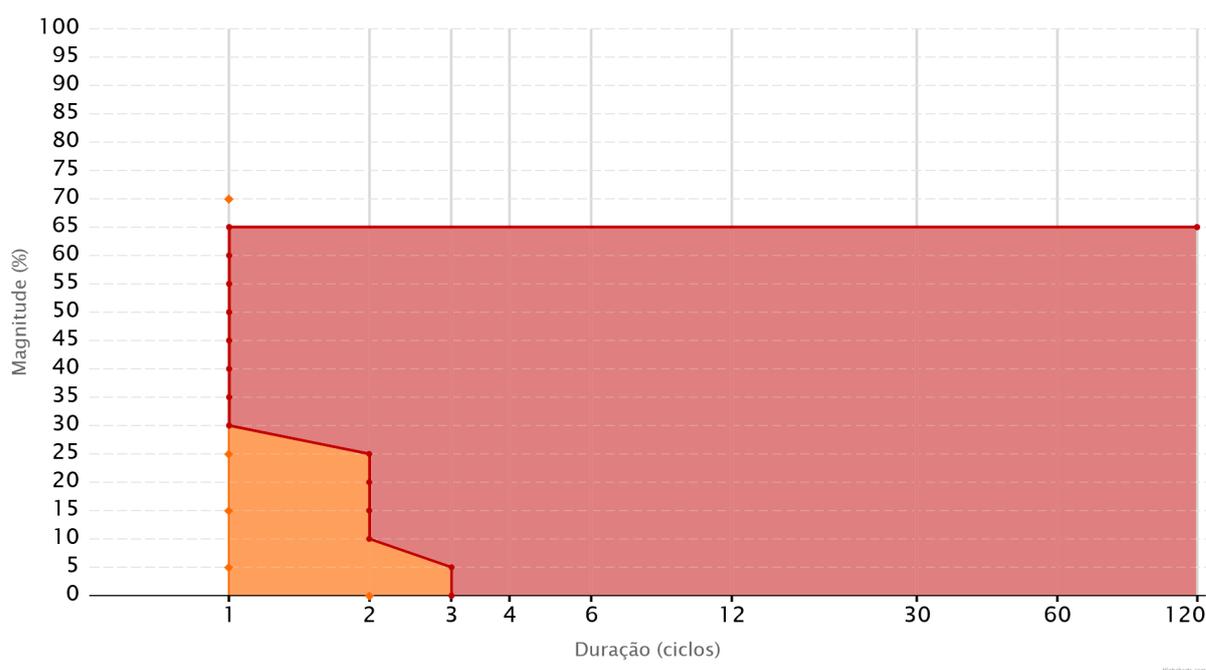


Figura 5.26 – Curva de sensibilidade obtida para o contator F, para ângulo de incidência em 135°.

### 5.2.3 Análises

Como as curvas obtidas são variadas, e agrupá-las todas em um único gráfico torna difícil a visualização, foi feito então o agrupamento conforme o ângulo de incidência do AMT, sendo as Figuras 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30, os resultados agrupados para os casos de 0°, 45°, 90° e 135°, respectivamente.

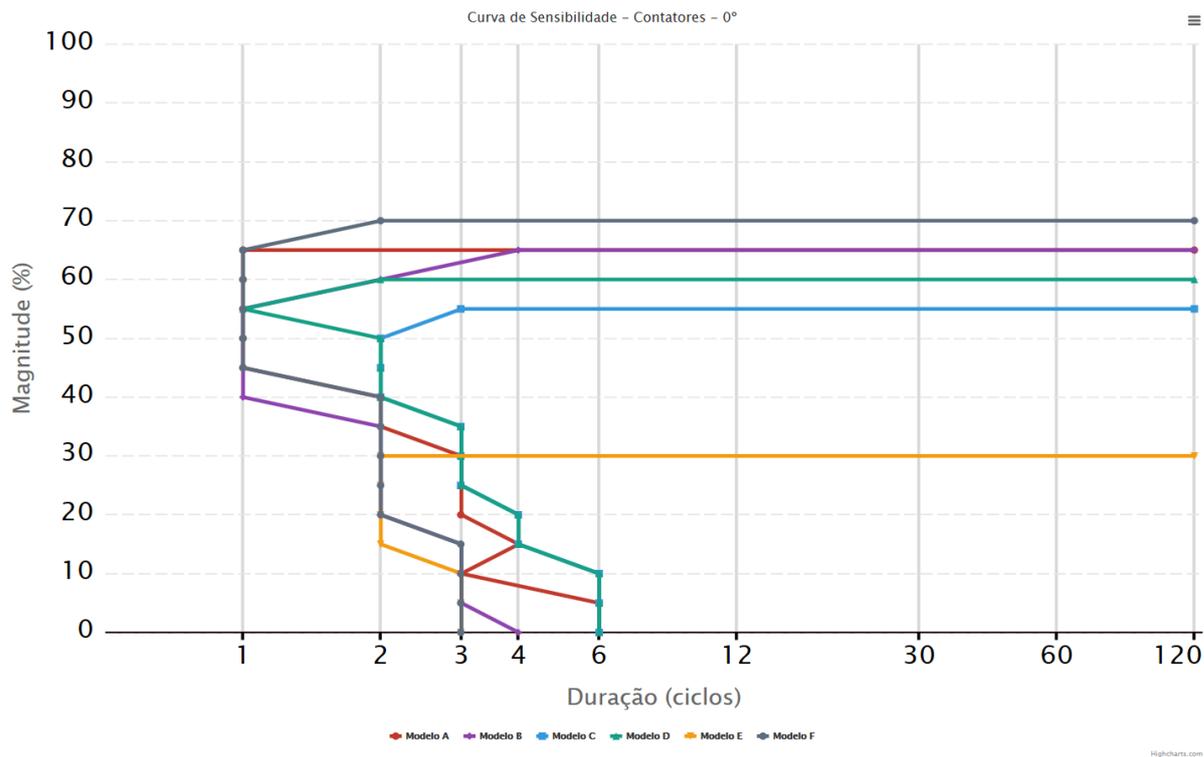


Figura 5.27 – Curvas de sensibilidade obtidas para os contatores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 0°.

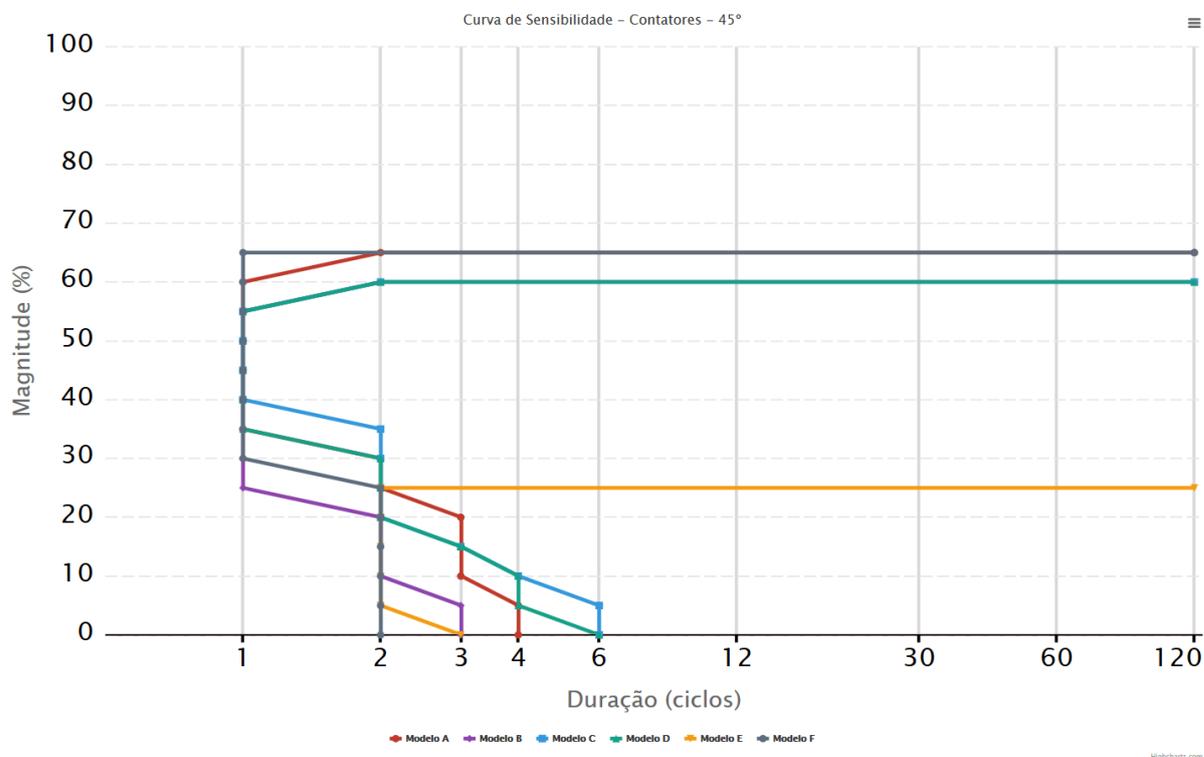


Figura 5.28 – Curvas de sensibilidade obtidas para os contatores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 45°.

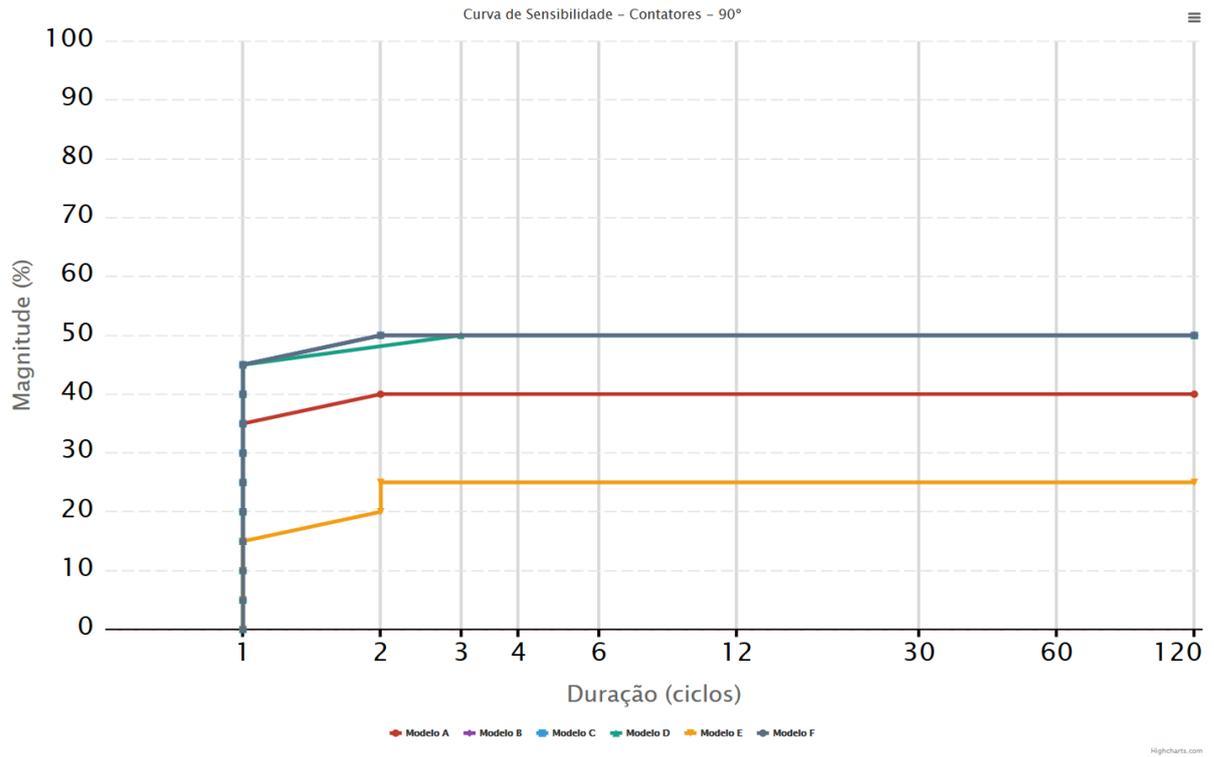


Figura 5.29 – Curvas de sensibilidade obtidas para os contatores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 90°.

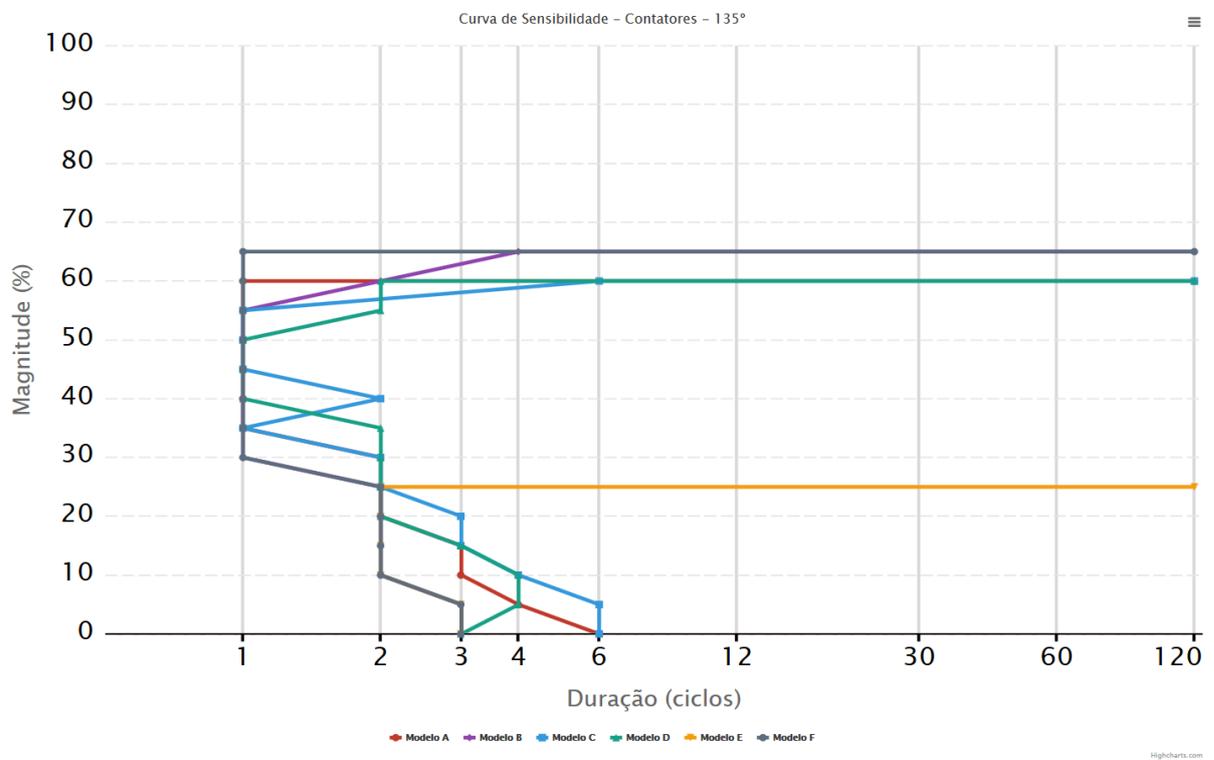


Figura 5.30 – Curvas de sensibilidade obtidas para os contatores, agrupadas conforme ângulo de incidência - 135°.

Quando o ângulo de incidência é de 0° os contatores apresentam maior sensibilidade

a magnitude do AMT, podendo suportar alguns AMTs mais severos de poucos ciclos. Enquanto que para  $90^\circ$ , apresentam maior sensibilidade a duração. Os casos de  $45^\circ$  e  $135^\circ$  apresentam sensibilidade intermediária entre os valores de 0 e  $90^\circ$ , apresentando muitas semelhanças entre si no formato da curva.

A região de incerteza mostrou-se presente em todas as curvas levantadas, com tolerância variando de 5 a 10%.

## 5.3 Contator CC e Fonte Chaveada

Após os testes dos contadores c.a., foram testados também os contadores c.c., utilizando fonte chaveada para alimentação. Portanto, para este caso, analisa-se a sensibilidade das fontes em conjunto com os contadores.

### 5.3.1 Montagem da bancada

Para o caso estudado, foram testadas 3 fontes de mesma marca, porém de diferentes potências, conforme a Tabela 5.2. E como carga e referência de falha, foram utilizados dois contadores c.c. de mesma características dos modelos C e D apresentados na Tabela 5.1, porém de alimentação  $24V_{cc}$ .

Tabela 5.2 – Modelos de Fontes Chaveadas

Modelo	Tensão de Saída (V)	Corrente (A)
A	24	0,65
B	24	5
C	24	10

As fontes A e B foram testadas pelo RTDS, e sua montagem pode ser vista na Figura 5.31. Para a Fonte C, no entanto, houve sobrecarga da amplificadora, e o teste não pôde ser realizado no RTDS. Utilizou-se então outro equipamento cuja potência fosse compatível, a fonte de sinais arbitrários California. Os testes foram realizados de forma manual, sem automatismo, e a conexão dos equipamentos é apresentada na Figura 5.32.

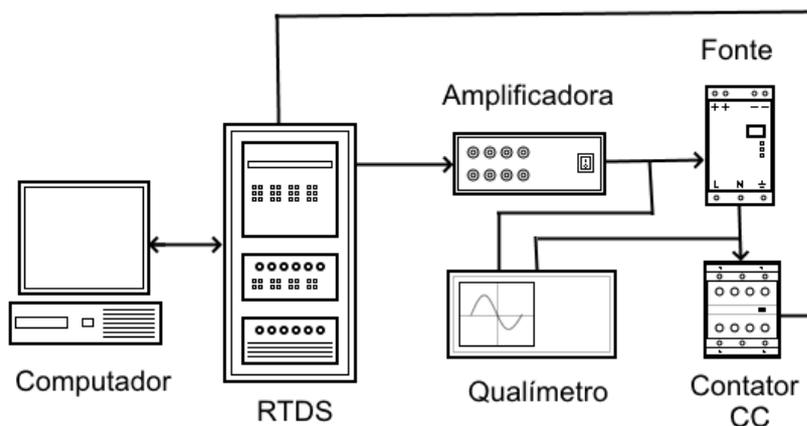


Figura 5.31 – Diagrama de conexões utilizado para testes com contator em corrente contínua utilizando o RTDS.

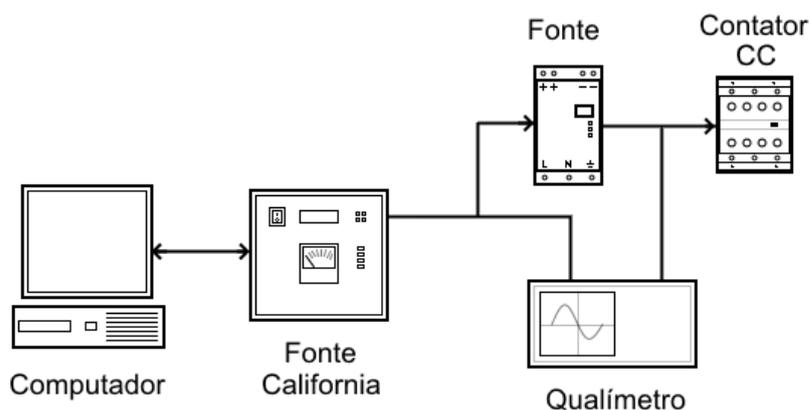


Figura 5.32 – Diagrama de conexões utilizado para testes com contator em corrente contínua utilizando a fonte California.

As fontes A e B foram testadas apenas com contatores como carga, buscando não ultrapassar o limite de potência da amplificadora. Assim, neste caso, foram utilizadas as respostas de abertura de contatos para a decisão de falha devido a ocorrência do AMT. O nível da tensão c.c. da fonte chaveada foi também registrado pelo qualímetro, e utilizado como conferência de resultados de falha.

No caso da fonte C, como os contatores disponíveis drenavam pouco de sua potência nominal, foi acrescentada uma carga resistiva de modo que a fonte trabalhasse mais próxima de sua potência nominal. Foi testada, então, em ambas condições de operação, em carga leve - apenas contatores - e em carga nominal - contatores e carga resistiva. O critério de falha foi, novamente, de abertura dos contatos do contator associado, porém, obtido de forma manual, sendo conferido com a queda da tensão c.c. registrada pelo qualímetro.

### 5.3.2 Resultados - Fonte alimentando somente Contator

Os resultados obtidos para as fontes e contatores em corrente contínua são apresentados nesta seção. Como não foram observadas diferenças nas curvas para as mudanças no ponto de início, de 0°, 45°, 90° e 135°, foram reduzidos os testes para 0° e 90° somente.

Para a fonte A, a curva obtida é apresentada na Figura 5.33. A magnitude mais severa (menor magnitude) suportada é de 15% e a duração máxima de 30 ciclos.

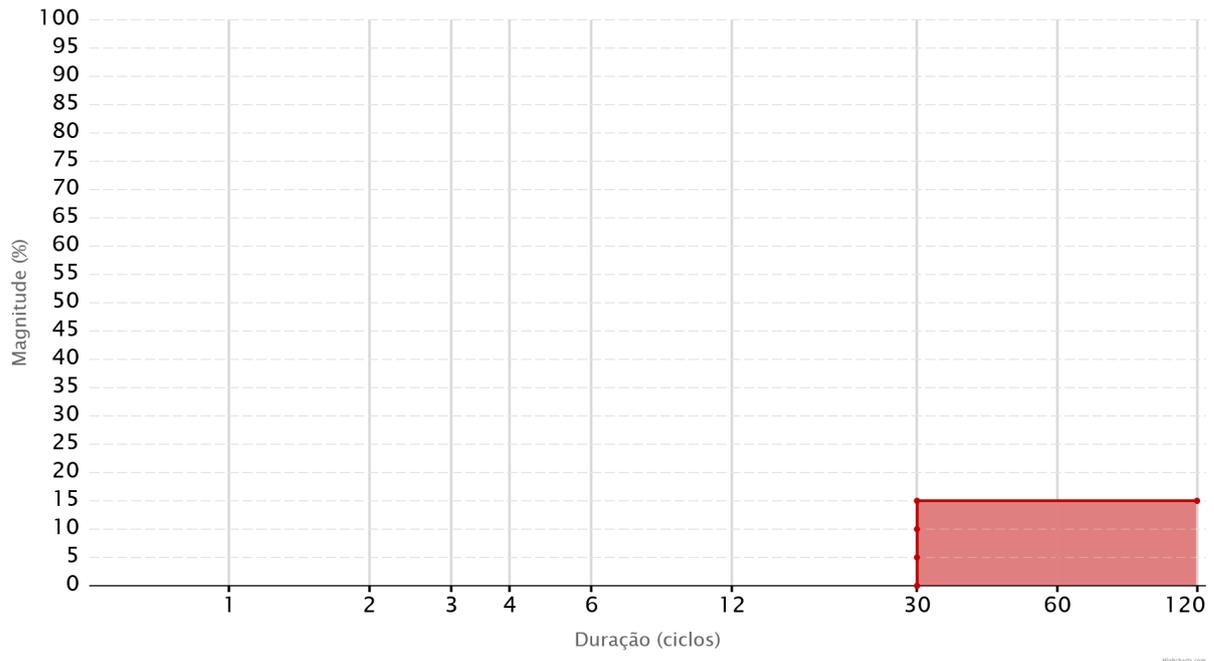


Figura 5.33 – Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte A para 0 e 90°.

Já para a fonte B, a curva é apresentada na Figura 5.34, com magnitude suportada de 15% e a duração máxima de 60 ciclos.

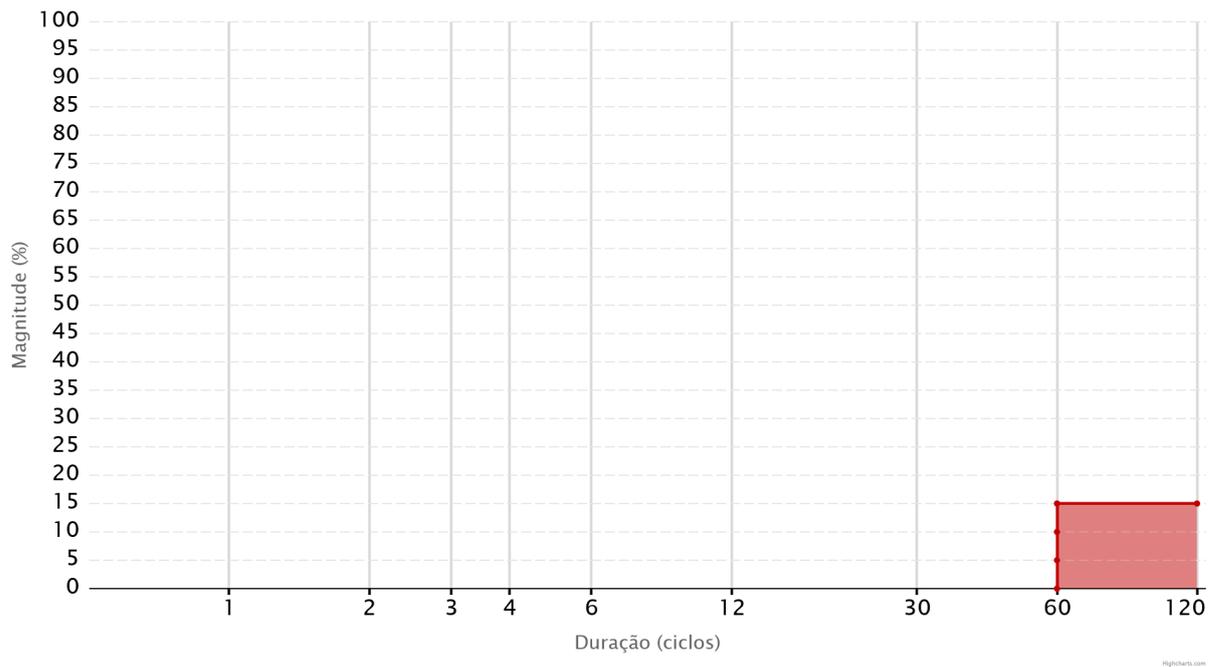


Figura 5.34 – Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte B para 0 e 90°.

E no caso da fonte C, utilizando apenas contatores como carga, a curva de sensibilidade é mostrada na Figura 5.35. Novamente, observa-se o padrão retangular, com magnitude suportada de 25% e duração máxima de 30 ciclos.

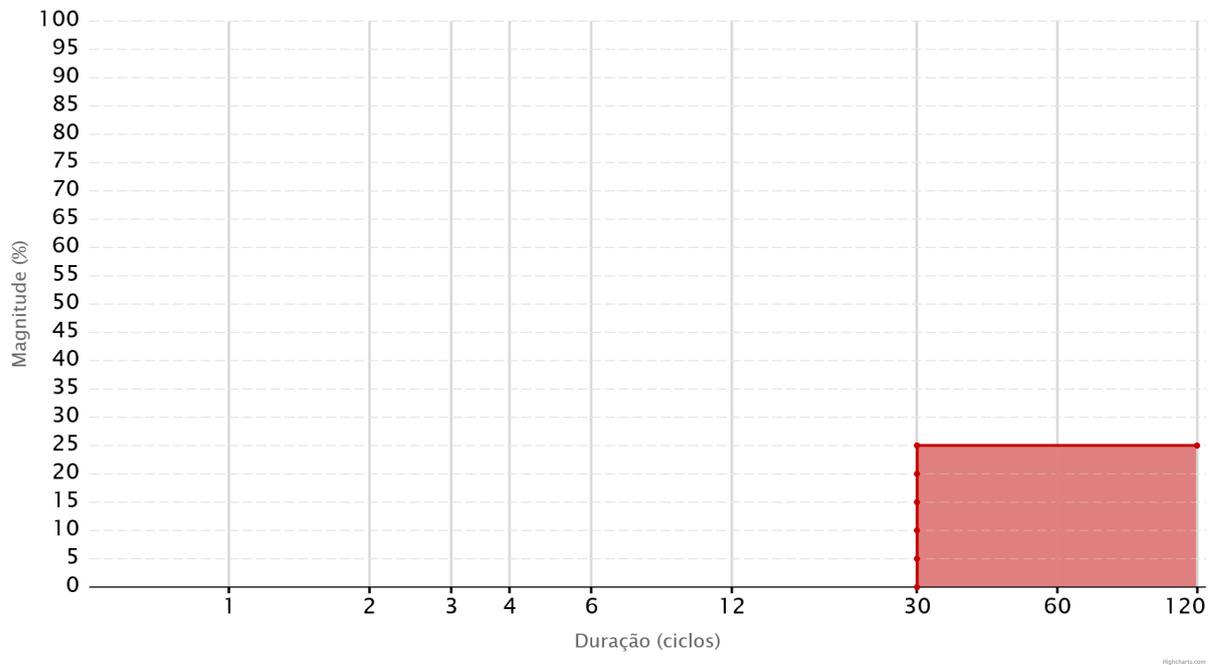


Figura 5.35 – Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte C para 0 e 90°.

### 5.3.3 Resultados - Fonte alimentando Contator e Resistor

Visto que a fonte C alimentando apenas contadores como carga exigia pouca potência (menos do que 10% de sua capacidade nominal), foi acrescentada uma carga resistiva de modo a fazê-la operar mais próxima de sua potência nominal. Dessa forma, foram aplicados novamente os AMTs para o levantamento de sua curva de sensibilidade, que pode ser vista na Figura 5.36. A magnitude suportada passa ser 30%, e há uma variação na duração da suportabilidade para magnitudes inferiores.

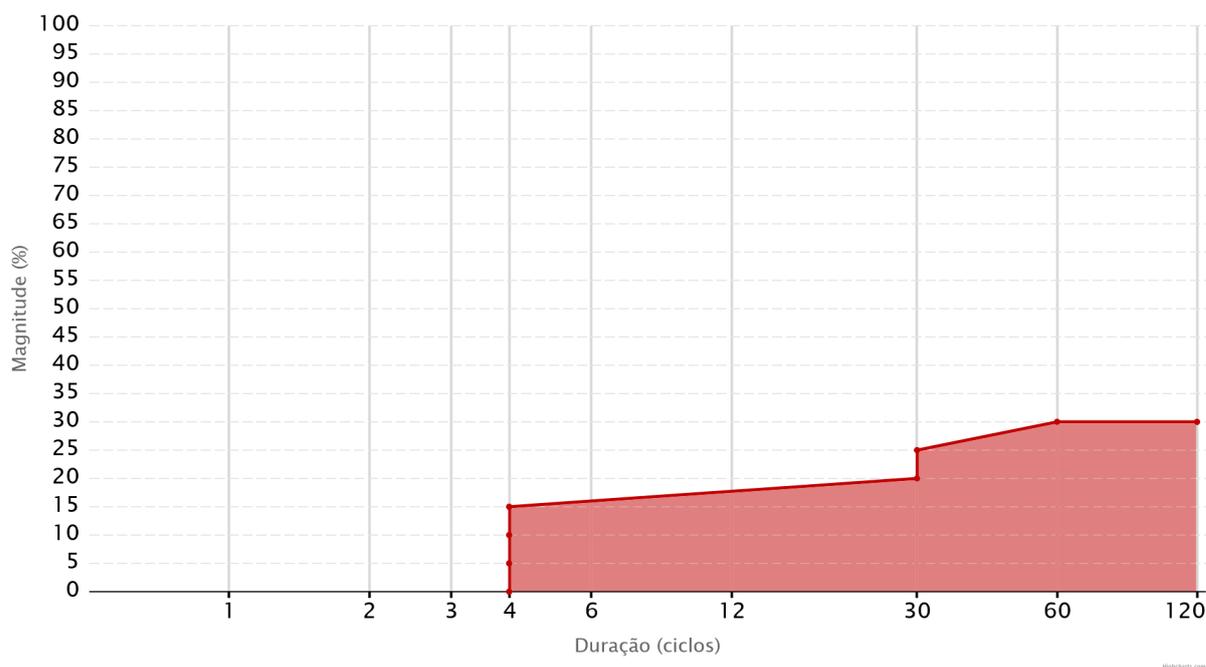


Figura 5.36 – Curvas de sensibilidade obtidas para o contator e fonte C com resistências para carga nominal, para 0 e 90°.

### 5.3.4 Análises

As curvas de sensibilidade obtidas podem ser vistas compiladas em um só gráfico na Figura 5.37. Para os casos com pouco carregamento das fontes, utilizando apenas contadores como carga, obteve-se curvas retangulares, com magnitudes suportadas de 15% para as fontes A e B, e 25% para a fonte C. No entanto, quando se exige mais potência da fonte C, a suportabilidade do conjunto fonte e contator piora.

A inserção do resistor faz o desempenho da fonte ficar pior, ou seja, suporta AMTs por menor tempo. Neste caso, o capacitor descarrega mais rápido, dissipando a energia armazenada na resistência.

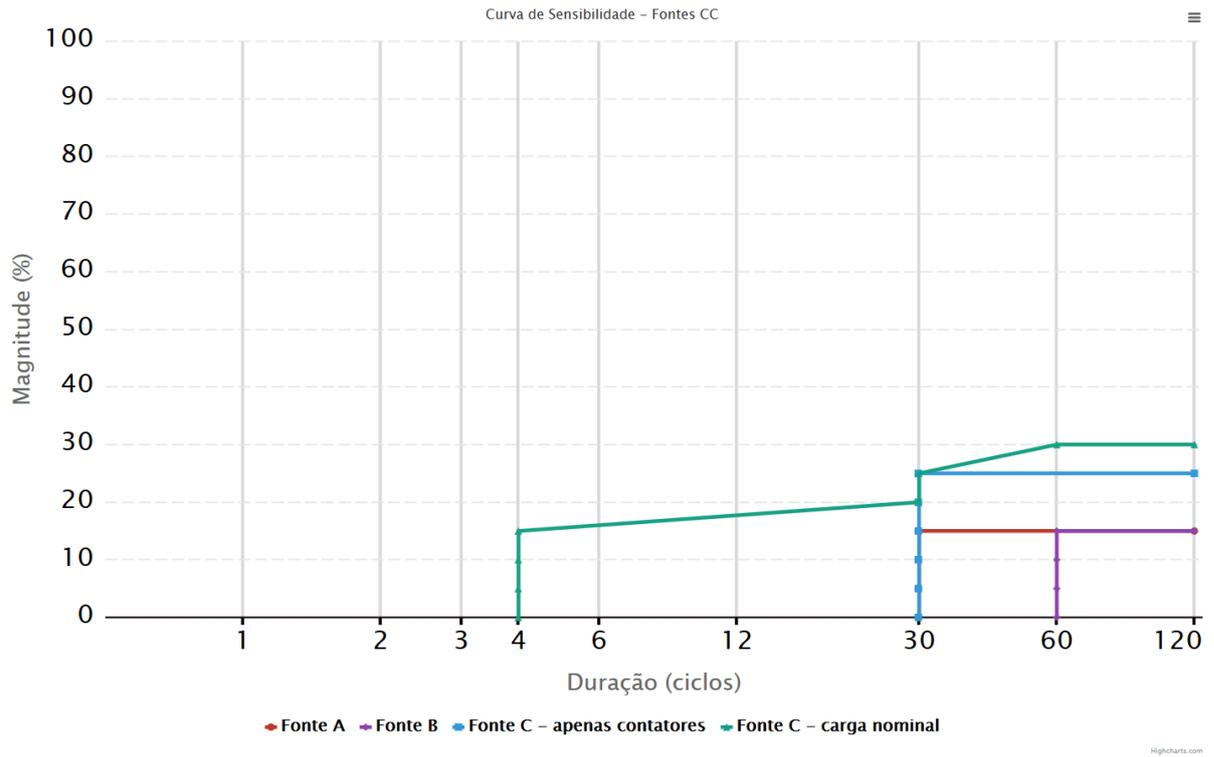


Figura 5.37 – Curvas de sensibilidade das fontes chaveadas testadas sobrepostas para comparação.

As curvas de sensibilidade não demonstraram variação com o ângulo de incidência do AMT. Isso não quer dizer, no entanto, que o equipamento se comporta de mesma forma para os casos analisados. Nas Figuras 5.38 e 5.39 pode-se observar as correntes de retorno para os afundamentos de tensão de 30% de magnitude iniciados em 0° e em 90°. Constata-se que ocorre maior surto de corrente para o caso de 90°.

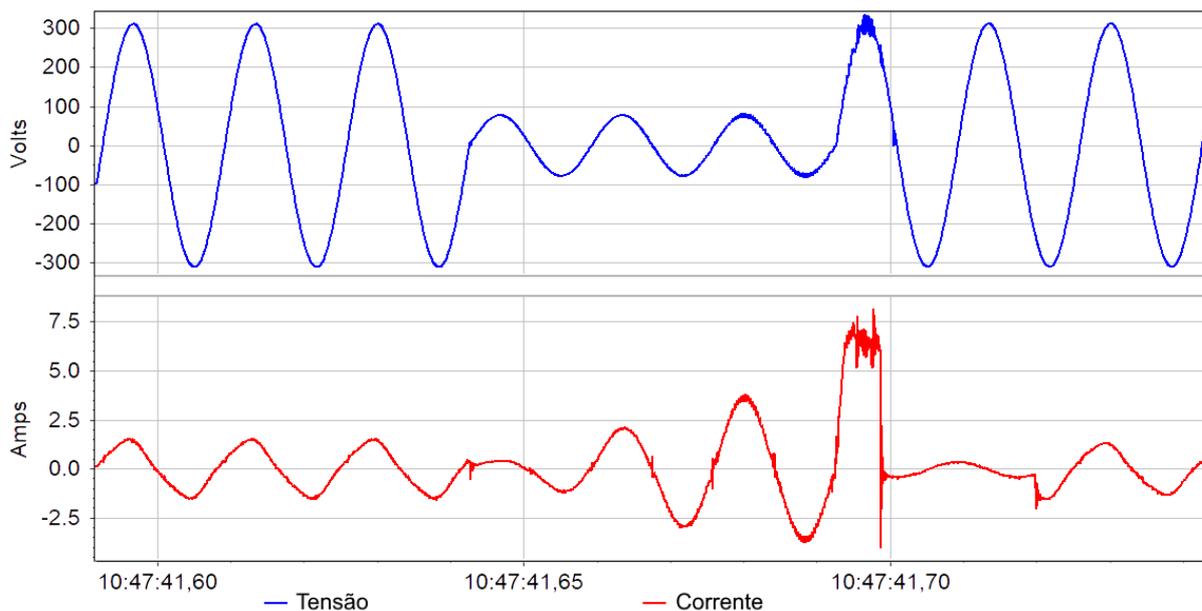


Figura 5.38 – Gráfico da corrente de retorno para magnitude de afundamento em 30% e ângulo de incidência em 0° para a Fonte C.

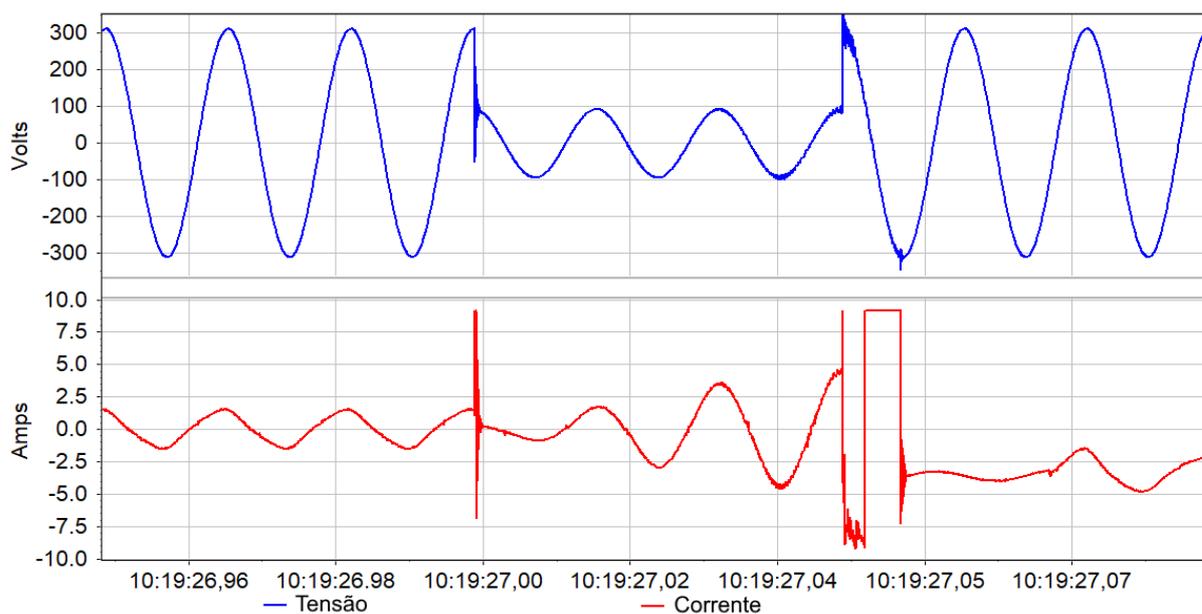


Figura 5.39 – Gráfico da corrente de retorno para magnitude de afundamento em 30% e ângulo de incidência em 90° para a Fonte C.

Ressalta-se que a ocorrência de surto de corrente ao final da incidência do AMT pode levar a perda de vida útil das fontes chaveadas.

As curvas obtidas não apresentaram região de incerteza, ou seja, em certos tipos de equipamento não há necessidade de repetição de testes. A experiência prática também mostrou que o tempo de intervalo entre aplicação de AMTs poderia ter sido maior, de

modo a evitar danos nos componentes. Destaca-se que a fonte modelo C foi danificada durante os testes.

## 5.4 Controlador Lógico Programável

Em seguida, foram feitos os testes individuais no Controlador Lógico Programável (CLP). Também foram utilizados dois relés auxiliares para acionar as entradas do CLP.

### 5.4.1 Montagem da bancada

As conexões utilizadas para teste do CLP podem ser vistas na Figura 5.40. O CLP é alimentado diretamente pela amplificadora, enquanto os relés auxiliam no chaveamento da entrada do CLP comandado pelo RTDS. Os AMTs são aplicados em condições distintas: apenas na alimentação do equipamento, na entrada (*input*) e finalmente em ambas as situações.

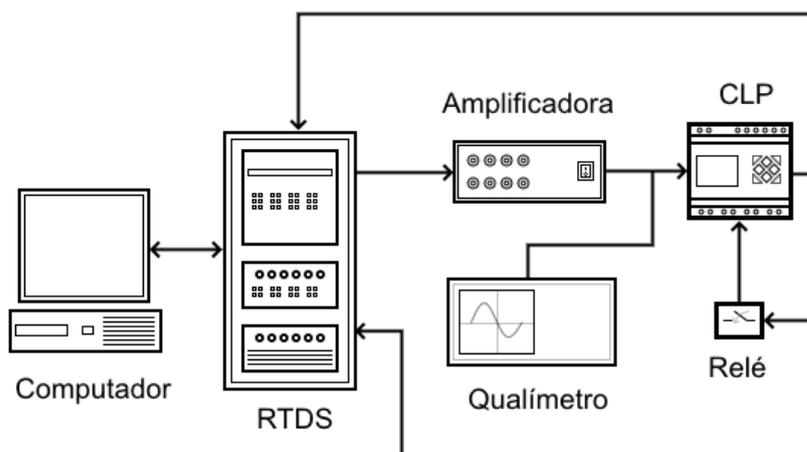


Figura 5.40 – Diagrama de conexões utilizado para testes com CLP, utilizando-se relé auxiliar para comando.

### 5.4.2 Resultados

Para o AMT aplicado na alimentação do CLP, a sensibilidade obtida foi a mesma para os casos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e pode ser vista da Figura 5.41.

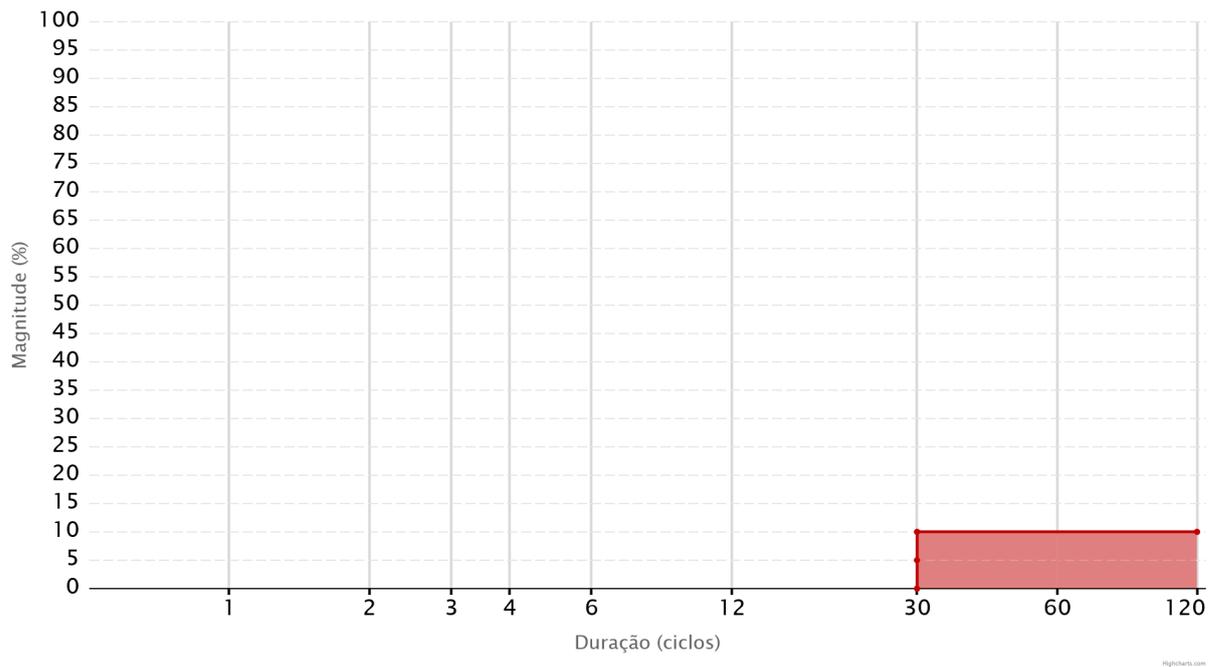


Figura 5.41 – Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP para ângulo de incidência do AMT na forma de onda em 0 e 90°, aplicado na alimentação do equipamento.

Já quando o AMT incide no *input*(entrada) do equipamento, houve uma leve diferença na curva. Para o caso de incidência em 0°, a Figura 5.42 mostra a curva de sensibilidade obtida, e para o caso de 90°, a Figura 5.43.

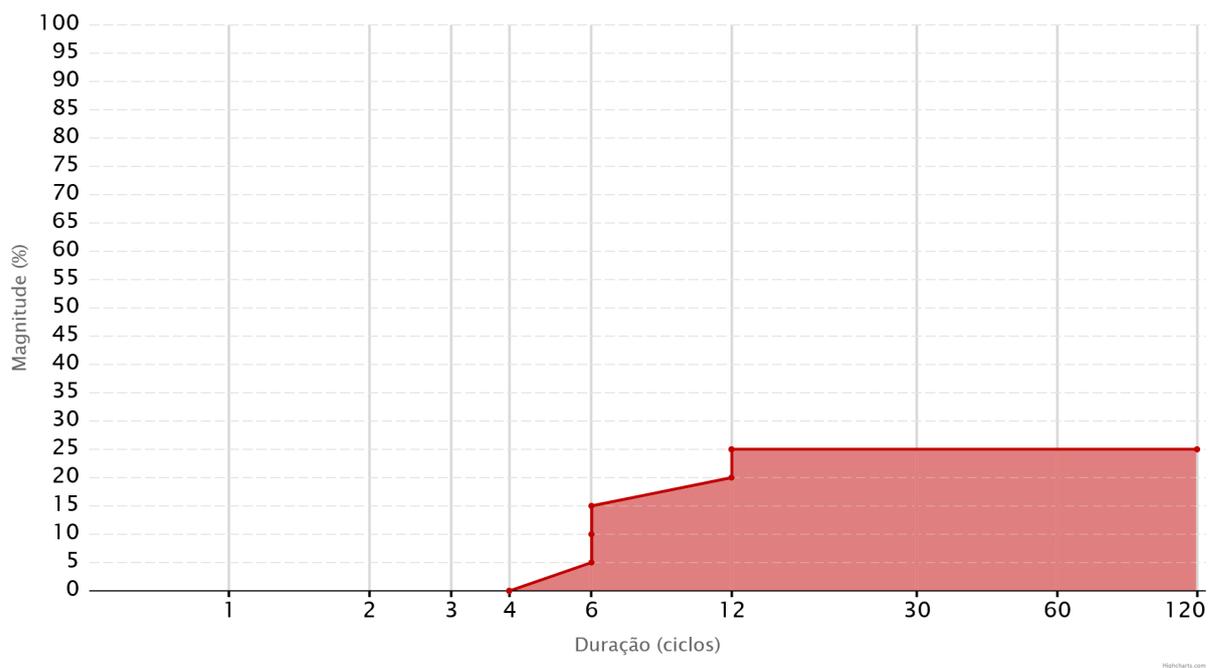


Figura 5.42 – Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP para ângulo de incidência do AMT na forma de onda em 0°, aplicado no *input*.

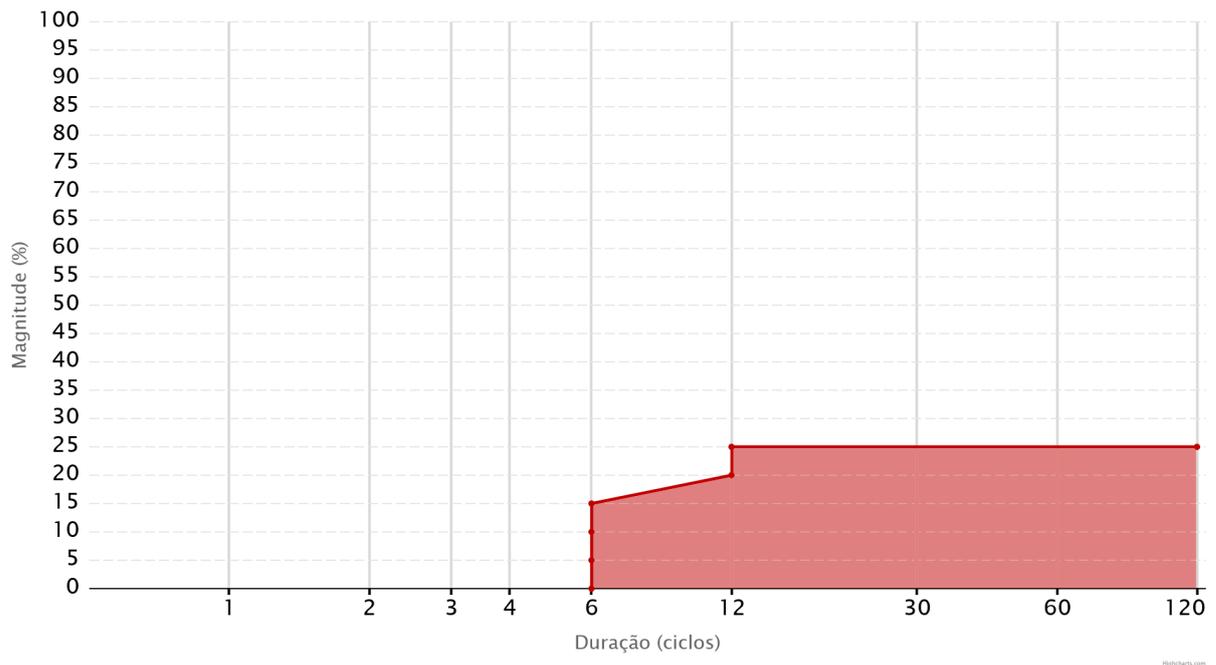


Figura 5.43 – Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP para ângulo de incidência do AMT na forma de onda em  $90^\circ$ , aplicado no *input*.

### 5.4.3 Análises

Para o Controlador Lógico Programável (CLP) analisado, foram obtidas 3 curvas de sensibilidade distintas conforme a incidência do AMT no equipamento, que podem ser visualizadas na Figura 5.44.

Pode-se ver que o caso que apresentou maior sensibilidade corresponde ao AMT aplicado na entrada (*input*) do CLP, com incidência em  $0^\circ$ . O mesmo resultado é obtido quando o AMT incide tanto na alimentação como no *input*. Para o caso de incidência em  $90^\circ$ , ocorre falha com duração de 6 ciclos, diferente do caso de  $0^\circ$ , que é sensibilizado com 4 ciclos.

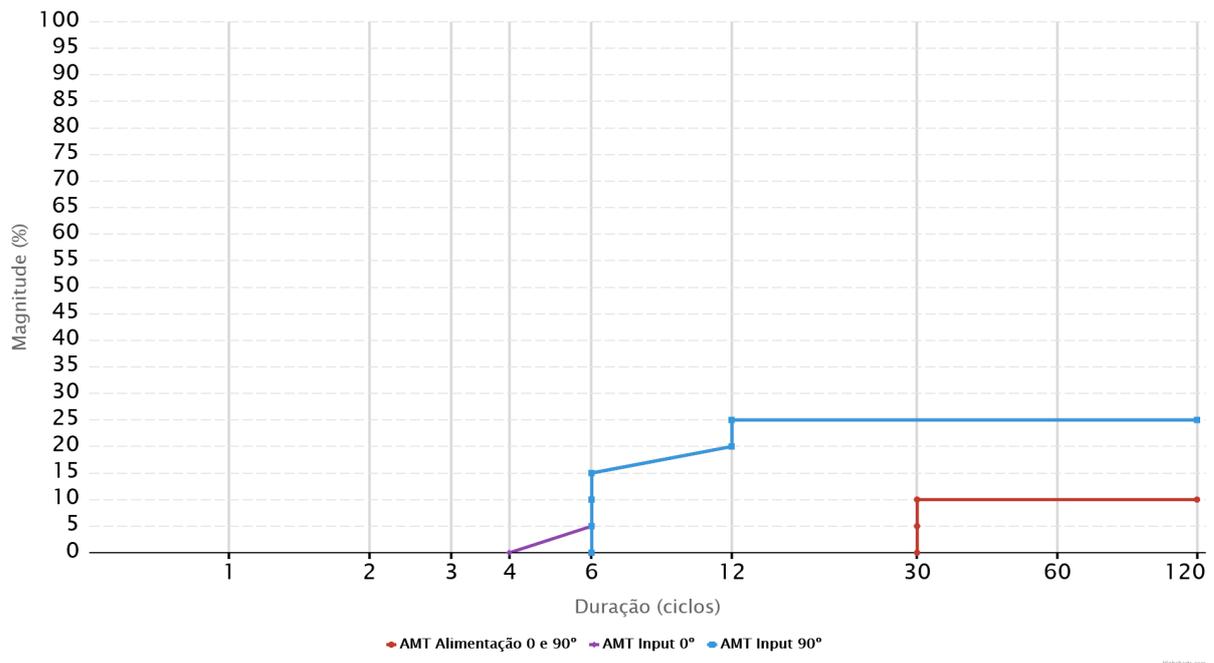


Figura 5.44 – Curvas de sensibilidade obtidas para o CLP agrupadas conforme os casos previamente apresentados.

## 5.5 Bancada Industrial

Por fim, foi simulada uma representação de bancada industrial hipotética combinando-se os diversos equipamentos já testados:

- Contator c.a. (modelo C);
- Contator c.c.;
- Fonte Chaveada 24V (modelo B);
- Controlador Lógico Programável (CLP).

Esta montagem visa analisar se há mudança no comportamento dos equipamentos frente a AMTs quando operam em conjunto, como ocorre na situação de um sistema industrial real. O critério de falha utilizado para esse teste foi monitorado pela porta lógica OU, ou seja, se ao menos um componente apresentar falha, considera-se uma falha para toda a bancada.

### 5.5.1 Montagem da bancada

Para a montagem da bancada, foram conectados todos os três componentes à saída da amplificadora (sendo o contator c.c. conectado através da fonte chaveada), e os detalhes podem ser vistos na Figura 5.45.

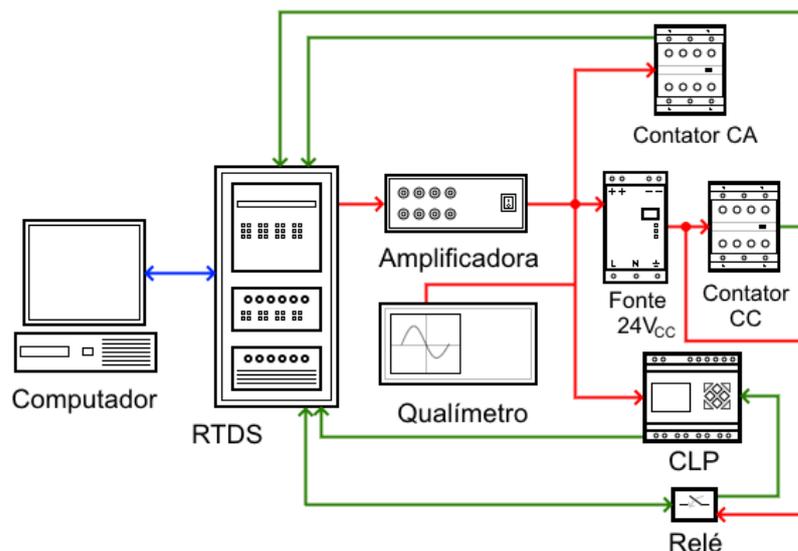


Figura 5.45 – Diagrama de conexões utilizado para testes com a combinação de vários equipamentos conectados simulando uma bancada industrial - contator CA, contator CC, fonte chaveada e CLP.

### 5.5.2 Resultados

Os resultados obtidos dos testes realizados na bancada industrial são então compilados sob a forma de curva de sensibilidade equivalente, que pode ser visualizada na Figura 5.46.

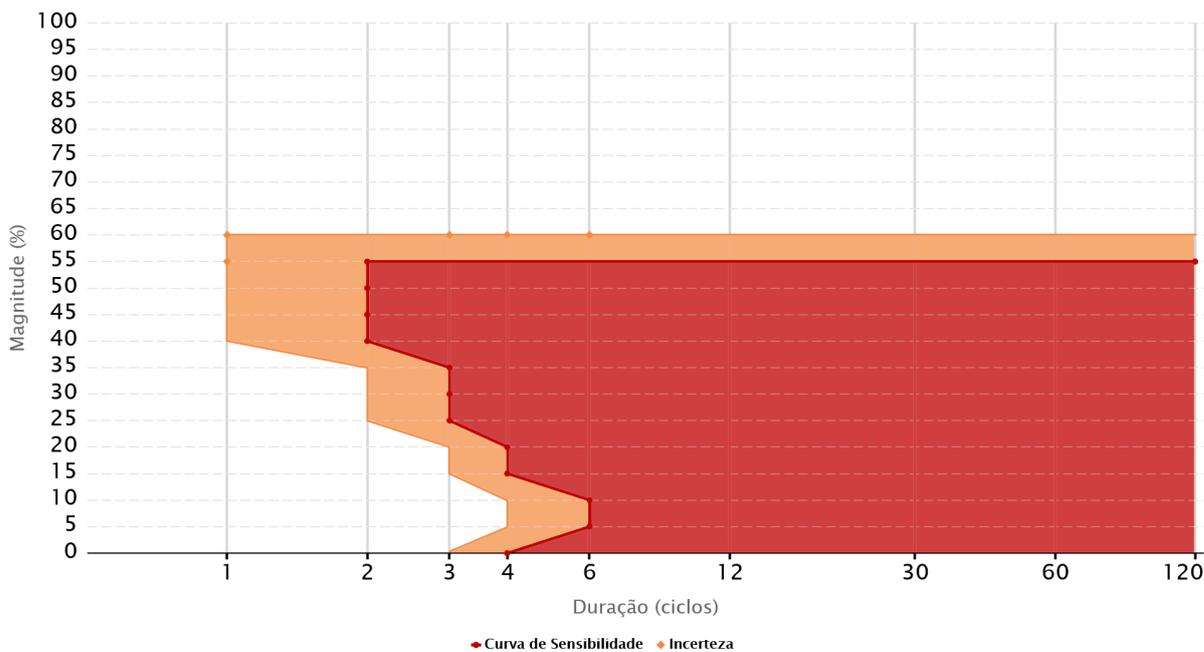


Figura 5.46 – Curva de sensibilidade obtida para a bancada do conjunto de equipamentos, adotando-se o critério de falha para o primeiro equipamento que apresentar avaria. AMT aplicado em 0°.

A curva de sensibilidade equivalente corresponde a composição das regiões mais sensíveis no plano tensão x tempo de cada um dos componentes da bancada industrial, conforme pode ser observado na Figura 5.47.

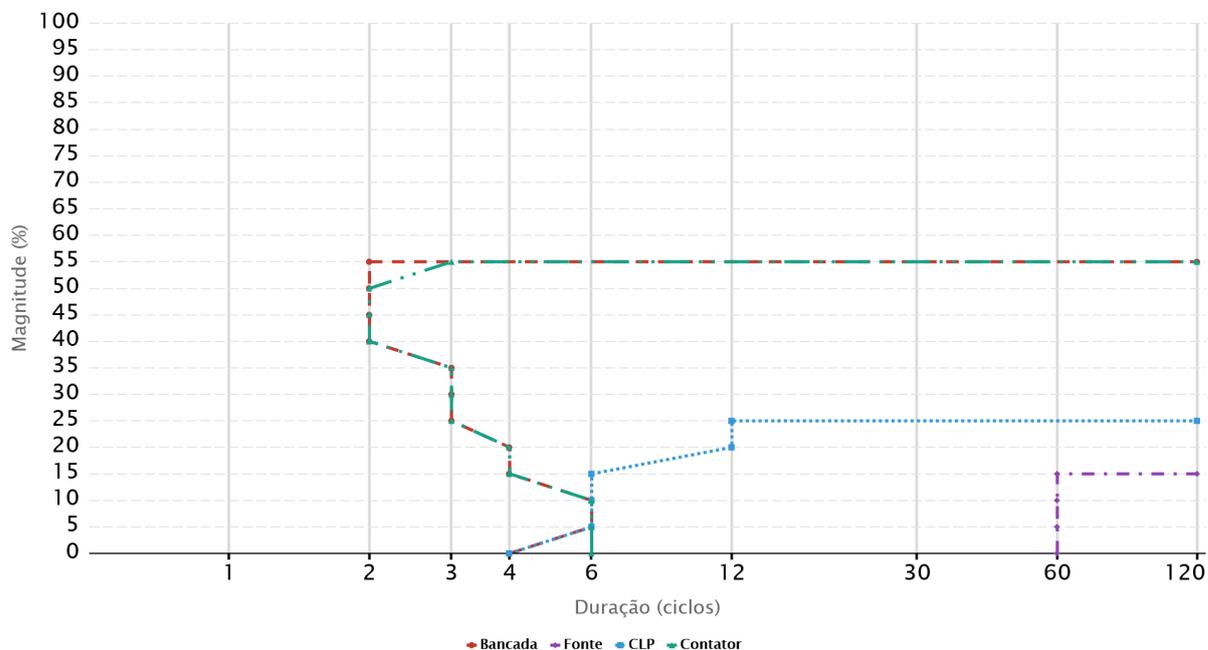


Figura 5.47 – Curvas de sensibilidade dos equipamentos sobrepostas para comparação.

## 5.6 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados a montagem da bancada laboratorial para realização dos testes, bem como os resultados obtidos, em forma de curva de sensibilidade.

Pôde-se observar as diferenças nas curvas dos contadores c.a. para os casos distintos de ponto de início do AMT para cada ângulo de incidência estudado ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ ). Para outros equipamentos, como as fontes chaveadas, as curvas de sensibilidade obtidas foram as mesmas, porém, com diferenças no comportamento da corrente quando da recuperação da tensão. No caso do CLP, houve uma diferença pequena entre as curvas de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

Separados os quatro casos específicos de ponto de início do AMT na forma de onda da tensão, para os casos dos contadores c.a., pode-se observar as semelhanças e diferenças de comportamento dos equipamentos, tanto no formato da curva de sensibilidade como na variação de comportamento para o caso de  $90^\circ$ , onde a suportabilidade à magnitude é maior, mas à duração, em contrapartida, é menor.

As fontes chaveadas associadas a contadores c.c. obtiveram suportabilidades consideravelmente melhores se comparadas ao acionamento de contadores c.a. utilizando pouco de sua potência. Para o caso de potência nominal, a fonte apresenta sensibilidade maior.

Entende-se que este comportamento ocorre devido a existência de capacitor instalado na fonte.

O CLP apresentou sensibilidades distintas para aplicação do AMT na alimentação e na entrada (*input*) do equipamento. Quando aplicado em ambos os casos, ocorre a predominância da sensibilidade da entrada, que foi o caso de menor suportabilidade.

No caso do teste da bancada, onde todos os equipamentos foram testados em conjunto, houve basicamente uma sobreposição das curvas dos equipamentos, sendo mais notável a curva do contator, e para o caso de 0%, houve a falha do CLP primeiro. No "joelho" da curva, na magnitude de 55%, ocorreu a falha em 2 ciclos de duração, que anteriormente estava na zona de incerteza.

De forma geral, os resultados obtidos são semelhantes àqueles da literatura técnica. Os contadores apresentam diferentes sensibilidades devido ao ângulo de incidência do AMT, enquanto que o mesmo não ocorre para as fontes e CLP. O formato das curvas de sensibilidade dos contadores é também conforme esperado, e as magnitudes suportadas igualmente dentro da faixa esperada.

## 6 Conclusões

### 6.1 Conclusões Gerais

Para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação foi proposto e implementado um procedimento automatizado de simulação no RTDS, utilizando-se o *hardware-in-the-loop*, com o objetivo de otimizar a obtenção da curva de sensibilidade de equipamentos industriais frente a afundamentos de tensão.

A sequência de AMTs gerada e aplicada ao equipamento sob teste, segue a metodologia *Left-Right* (Esquerda-Direita), proposta pela IEEE 1668, que consiste em manter a magnitude do afundamento e aumentar gradativamente a duração, até que ocorra a falha do equipamento, ou acabem os passos de duração pré-determinados. Também foi aplicado uma sequência de 5 (cinco) repetições aos testes, de forma a analisar se ocorre uma região de incerteza na curva, onde pode ocorrer ou não a falha do equipamento para o mesmo AMT.

Foram testados alguns equipamentos comumente utilizados em indústrias, tais como contadores, fontes chaveadas e CLPs. Para a realização de testes de um dos casos de fonte chaveada (de 10A), foi necessária a utilização da fonte de sinais arbitrários disponível no Laboratório, visto que tal componente excedeu o limite de potência da caixa amplificadora do RTDS. Assim, pôde-se tirar normalmente as conclusões sobre a sensibilidade dos equipamentos, bem como sobre as metodologias de testes adotadas no estudo, as quais são listadas a seguir:

- A utilização do método *Left-Right* com repetições permitiu a visualização de uma região de incerteza nas curvas de sensibilidade dos contadores em corrente alternada. No entanto, tal comportamento não foi visto nos outros equipamentos testados (contadores em corrente contínua associado a fonte chaveada e CLP);
- A região de incerteza na curva de sensibilidade pode influenciar na análise do impacto decorrente dos AMTs, tanto na especificação dos equipamentos de mitigação, como na análise de custo benefício dos investimentos;
- É importante definir a priori qual é o melhor método a ser utilizado para a obtenção das curvas de sensibilidade. Resultados preliminares mostraram que o método *Top-Down*, por exemplo, pode ocultar certas zonas de suportabilidade dos contadores em corrente alternada, em comparação ao método *Left-Right*. O método da dicotomia poderia ter sido utilizado para testar as fontes chaveadas, já que poderia ter evitado

a avaria da fonte de 10A, pois tal método busca reduzir o estresse aplicado aos equipamentos, reduzindo-se a quantidade de teste aplicados;

- Embora sejam ferramentas importantes na análise do impacto dos AMTs, as curvas de sensibilidade podem ocultar informações importantes. Para o caso das fontes chaveadas, por exemplo, apesar das curvas obtidas serem idênticas em relação a variação de início do afundamento de tensão na forma de onda, há uma maior corrente de retorno para o caso de 90°. Tal pico de corrente pode comprometer a vida útil dos equipamentos, e que de fato colaborou para a avaria da fonte chaveada de 10A;
- Considerando-se que diversos equipamentos operam em conjunto em uma planta industrial, o equipamento mais sensível será o responsável pelo desempenho de todo o sistema, mesmo que os outros componentes apresentem suportabilidade maior. Isso fica claro no teste realizado combinando-se os equipamentos testados, tendo a curva de sensibilidade resultante muito semelhante a do contator c.a. utilizado, que é o mais vulnerável dentre todos.
- As curvas obtidas dos testes são condizentes com as disponíveis na literatura técnica, sendo notável a diferença na sensibilidade devido ao ângulo de incidência apenas para os contatores, o que não ocorre para as fontes chaveadas e CLP. Os valores de magnitude e duração suportados de cada tipo de equipamento também estão dentro do esperado.
- Devido a presença de armazenador de energia (capacitor) nas fontes chaveadas, e também embutido na CPU do CLP, tais dispositivos apresentam maior robustez a AMTs. Assim, é viável analisar a substituição de equipamentos em corrente alternada para seus equivalentes em corrente contínua, como o caso dos contatores, que apresentam suscetibilidade maior a falhas.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para continuidade aos estudos relacionados ao tema deste trabalho, com foco em testes experimentais em equipamentos elétricos frente a afundamentos de tensão, são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros, considerando os pontos que não foram avaliados nesta dissertação ou que ainda carecem de investigações:

- Realizar testes para levantamento de curvas de sensibilidade utilizando-se o método da dicotomia, para verificação de sua validade e eficácia;
- Realizar testes utilizando dados reais de afundamentos considerando diferentes tensões pré falta e salto de ângulo;

- Aplicar testes em componentes de uso cotidiano no setor de serviços e comércio, como computadores de mesa e televisores de modelos mais atuais;
- Realizar testes comparativos de curvas de sensibilidade para equipamentos bivolt (automático ou manual).

### 6.3 Artigos Publicados

Parte do estudo abordado neste trabalho de dissertação foi também exposto em dois artigos, um apresentado na Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE-2019), referente aos contatores c.a. com o título de "*New Left-Right Characterization Method used for Contactor Sensitivity Curves*"; e outro referente aos contatores c.c. com o título de "Sensibilidade de Fontes em Corrente Contínua alimentando contatores frente a Afundamentos de Tensão", submetido ao Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI2020). Contudo, a avaliação dos artigos não foi divulgada, pois o evento foi adiado devido a pandemia de Covid-19 para junho de 2022.



O sinal de tensão leva em consideração a tensão e frequência nominais, sendo para o caso estudado 220V e 60Hz, respectivamente. Há também a adição de blocos de tensões múltiplas da fundamental ( $3^a$ ,  $5^a$ ,  $7^a$ ,  $11^a$  e  $13^a$  harmônicas), para possível estudo de tensões distorcidas. Os componentes para tal finalidade estão no bloco 1.

No bloco 3 ocorre a configuração da placa GTA0, que externaliza o sinal de tensão para os equipamentos, sendo o sinal N1 a tensão nominal (bloco 1) e o sinal N3 a tensão onde ocorre a incidência de AMT (abordado mais adiante no subsistema Sinal AMT, na Figura A.5). Internamente ao componente habilitam-se os canais de tensão utilizados na placa GTA0 e a relação de transformação para a caixa amplificadora.

O bloco 4 constitui os componentes e configurações necessárias para os testes com o CLP, onde há o controle de relé auxiliar pela placa GTFPI e a comparação dos sinais para decisão de falha (*trip*).

O subsistema de medição de distorção harmônica (bloco 2) é visto na Figura A.2.

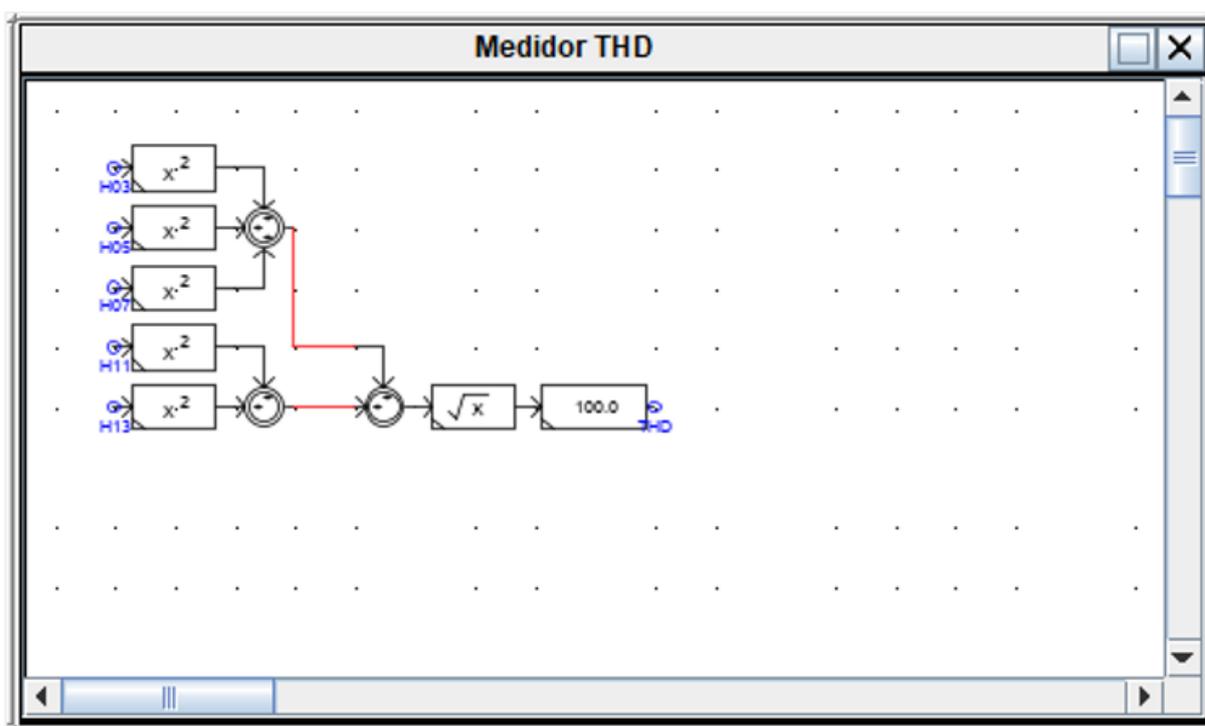


Figura A.2 – Subsistema para cálculo da distorção harmônica total (THD).

Na Figura A.3 pode-se visualizar o subsistema Lógica AMT, onde o sinal do AMT é feito matematicamente. Neste subsistema há a configuração para a seleção de ocorrer apenas um ou até quatro AMTs seguidos, representando a atuação de um religador. Para a obtenção de curvas de sensibilidade é configurado para a ocorrência de apenas um AMT, e as repetições são definidas pelo *script* executado no *RunTime*.

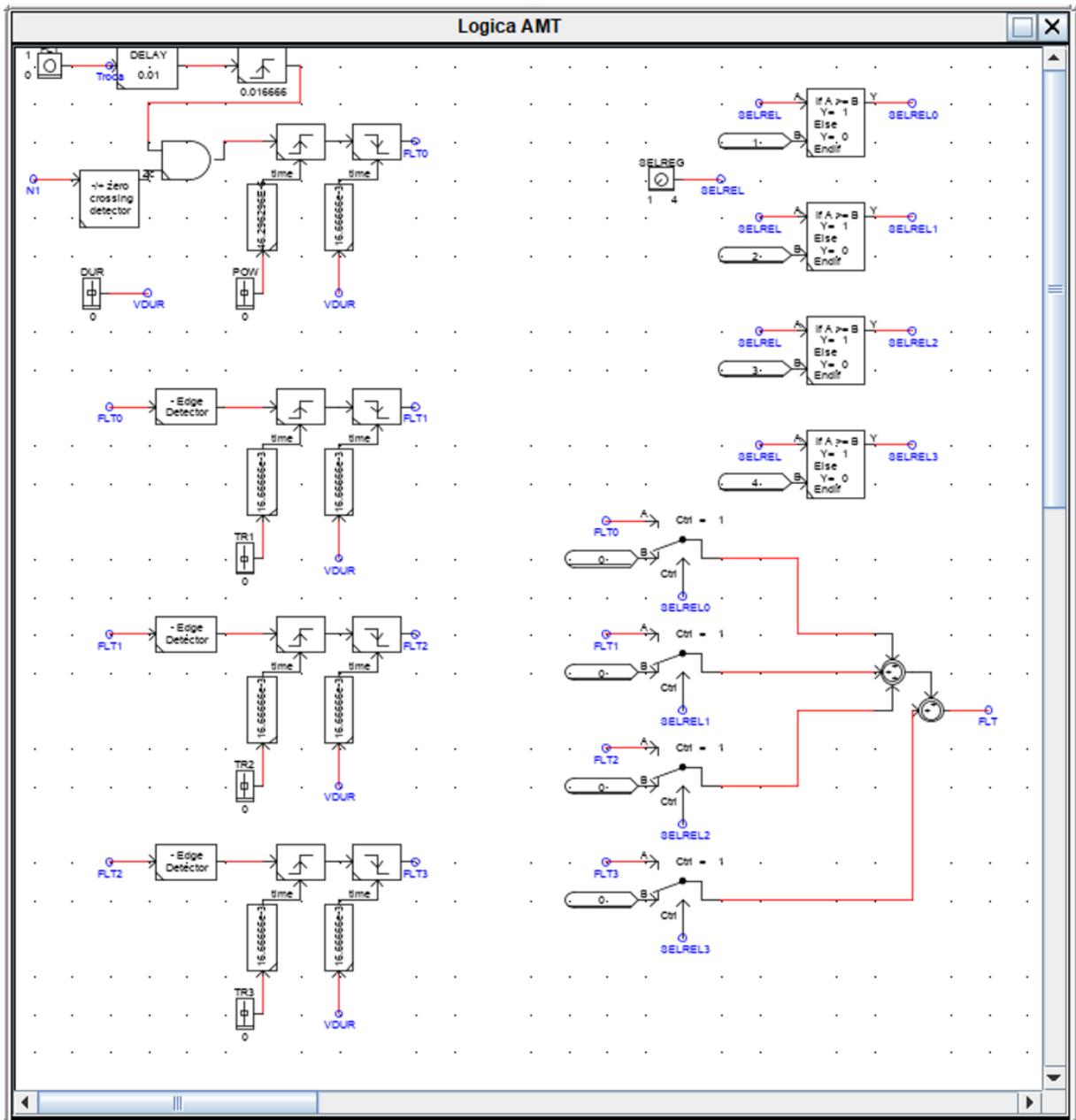


Figura A.3 – Subsistema Lógica AMT (bloco 2).

Ampliando-se a Figura A.3 com foco na parte principal do subsistema é obtida a Figura A.4, onde pode-se então visualizar os componentes para a ocorrência do AMT. O botão FLT indica a aplicação do AMT, e os *sliders* (botões deslizantes) indicam a duração DUR e VDUR) e ponto de início na forma de onda (POW).

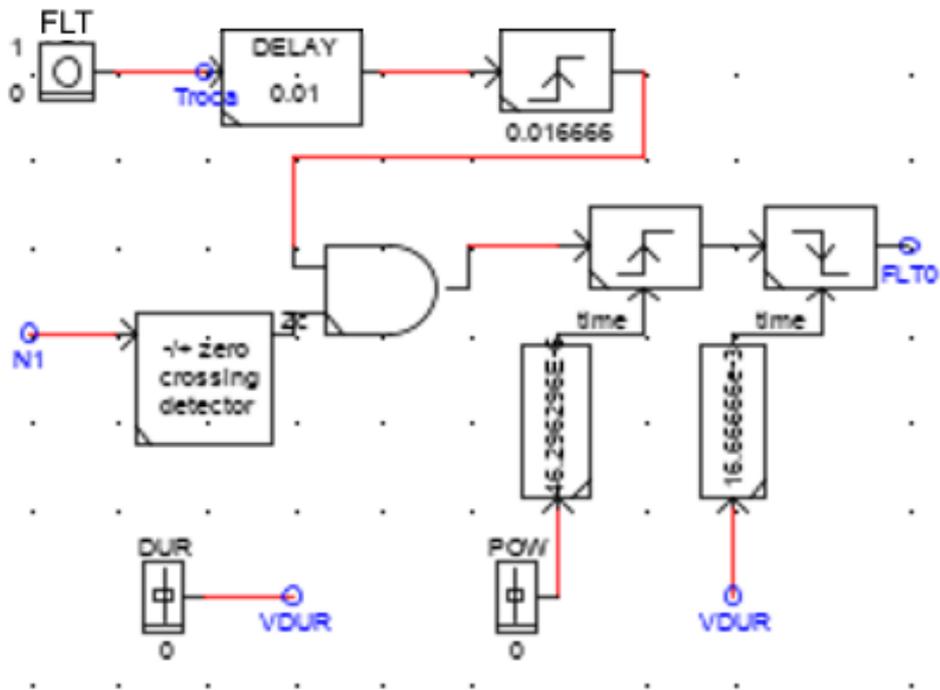


Figura A.4 – Subsistema Lógica AMT (bloco 2) ampliando-se a parte principal.

Na Figura A.5 pode ser visto o subsistema Sinal AMT (bloco 2 da Figura A.1) para a composição do sinal N3 (AMT definido pela simulação), que é então exportado pela placa GTA0 (bloco 3). Utiliza-se o sinal FLT obtido no subsistema Lógica AMT e um *slider* para a seleção da magnitude do AMT em %.

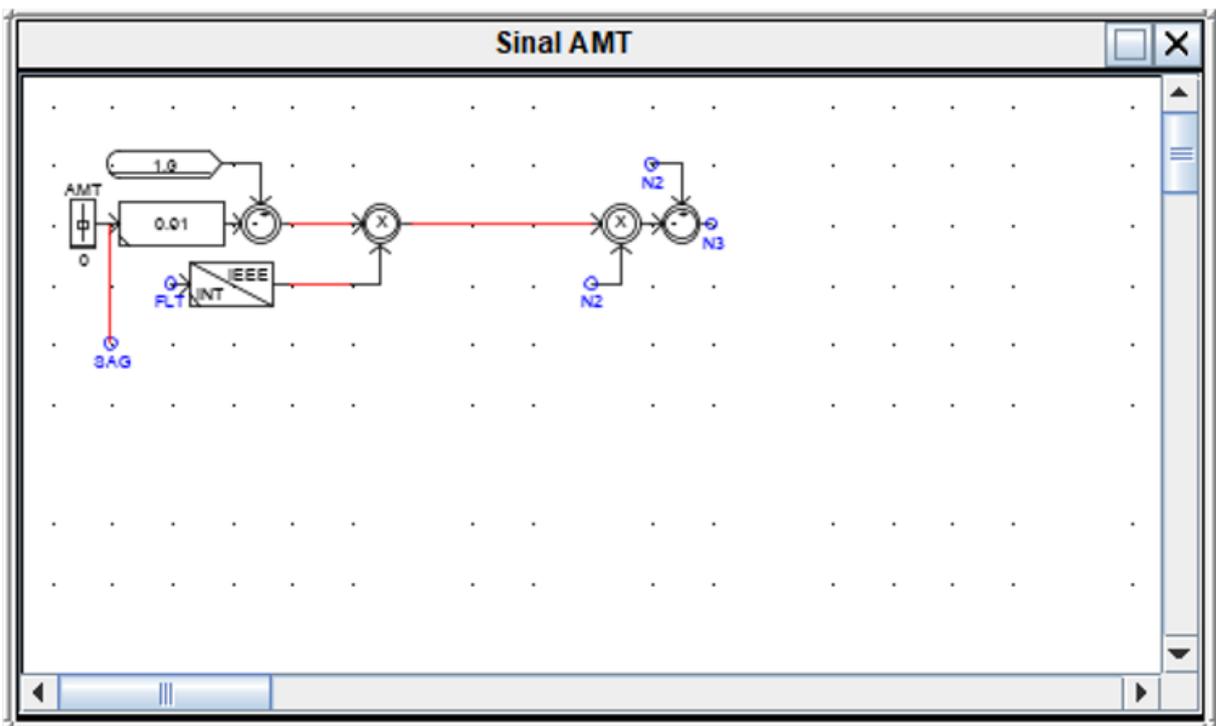


Figura A.5 – Subsistema Sinal AMT (bloco 2).

# Referências

- 1 COSTA, M. V. da. *Uma Contribuição à Regulamentação das Variações de Tensão de Curta Duração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2018. 19
- 2 WESTIN, N. de O. P. *Alocação Ótima de Religadores em Redes de Distribuição considerando Variações de Tensão de Curta Duração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2020. 19
- 3 BOLLEN, M. *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*. [S.l.: s.n.], 2000. 20, 24, 28, 29, 30, 42, 43
- 4 DUGAN, R. et al. *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. McGraw-Hill Education, 2012. ISBN 9780071761567. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=h1iBVtbSeIOC>>. 22, 26, 31, 41
- 5 ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica, revisão 12*. 2021. 23, 30
- 6 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, p. 1–98, 2019. 23
- 7 Bollen, M. et al. Voltage dip immunity of equipment and installations - status and need for further work. In: *CICED 2010 Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8. 23, 24, 25, 26, 29, 30, 39, 40, 43
- 8 VUKOSAVIC, S. N. *Electrical Machines*. [S.l.: s.n.], 2013. 650 p. 24
- 9 Larabee, J.; Pellegrino, B.; Flick, B. Induction motor starting methods and issues. In: *Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 217–222. ISSN 2161-8127. 24
- 10 SHORT, T. *Electric Power Distribution Handbook*. [S.l.: s.n.], 2003. ISBN 9780203486504. 24
- 11 BAGGINI, A. *Handbook of Power Quality*. [S.l.: s.n.], 2008. 1-618 p. 25, 26, 40
- 12 IEEE Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V. *IEEE Std 1668-2017 (Revision of IEEE Std 1668-2014)*, p. 1–85, Nov 2017. 29, 30, 46, 47, 49
- 13 Collins, E. R.; Bridgwood, M. A. The impact of power system disturbances on ac-coil contactors. In: *1997 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 2. 6 pp.–. ISSN 1049-3328. 34
- 14 Djokic, S. Z.; Milanovic, J. V.; Kirschen, D. S. Sensitivity of ac coil contactors to voltage sags, short interruptions, and undervoltage transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 3, p. 1299–1307, July 2004. ISSN 0885-8977. 34
- 15 Hardi, S. et al. Equipment performance due to voltage sags – test results for contactor and induction motor. *GSTF Journal of Engineering Technology*, v. 2, 12 2013. 34

- 16 Yapen Wu et al. Characterizing the tolerance performance of plcs to voltage sag based on experimental research. In: *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 496–501. 36
- 17 Xu, Y. et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 1, p. 2–10, 2019. 36
- 18 Bollen, M. H. J.; Zhang, L. D. Analysis of voltage tolerance of ac adjustable-speed drives for three-phase balanced and unbalanced sags. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 36, n. 3, p. 904–910, 2000. 36
- 19 Sarmiento, H. G.; Estrada, E. A voltage sag study in an industry with adjustable speed drives. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 2, n. 1, p. 16–19, 1996. 36
- 20 da Motta, L. J. et al. Power supplies under sags and distorted ac voltage. In: *2019 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. 38
- 21 MOTTA, L. J. da. *Análise da Imunidade de Fontes de Computador Frente a Distorções Harmônicas e Afundamentos de Tensão: Verificação dos Limites Normativos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2021. 38
- 22 Djokic, S. Z. et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 375–383, 2005. 38
- 23 Bok, J.; Drapela, J.; Toman, P. Personal computers immunity to short voltage dips and interruptions. In: *2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. 38
- 24 FILHO, J. M. de C. *Uma contribuição à avaliação do atendimento a consumidores com cargas sensíveis – Proposta de novos indicadores*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2000. 39, 40
- 25 Farmad, H. S.; Mozayyani, M. R. Power quality customer financial impact/risk assessment tool. In: *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4. 40
- 26 ABRACE. *Contribuições referentes à Audiência Pública No 082/2015*. [S.l.], 2015. 40, 41
- 27 Gupta, C. P.; Milanovic, J. V. Costs of voltage sags: Comprehensive assessment procedure. In: *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–7. 40
- 28 Chen, W. et al. Economic analysis of voltage sag loss and treatment based on on-site data. In: *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4. 40
- 29 Salim, F. et al. Voltage sags cost estimation for malaysian industries. In: *2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 41–46. 40
- 30 Bollen, M. H. J. et al. Voltage dip immunity of equipment and installations - messages to stakeholders. In: *2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 915–919. 43

- 31 PASSOS, F. O. *Localizador da Fonte de AMTs baseado nas Medições de Tensão de Fronteira*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2015. 43
- 32 ELECTROMAGNETIC compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current up to 16 A per phase. *IEC*, p. 58, Nov 2004. 45, 46
- 33 Ma, Z. et al. A new method for sensitive single-phase equipment testing to voltage sag. In: *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2164-0610. 51
- 34 Ouyang, S.; Liu, L. Test and study on sensitivity of electronic circuit in low-voltage release to voltage sags. *IET Circuits, Devices Systems*, v. 11, n. 6, p. 529–534, 2017. ISSN 1751-8598. 52, 53
- 35 ANTUNES, K. C. S. *Análise do Desempenho das Proteções Diferenciais de Fase e Baseada em Sequência Negativa para Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2019. 55
- 36 LINO, T. dos S. S. *Análise Comparativa dos Esquemas de Teleproteção em Linha de Transmissão em Circuito Duplo através de uma Estrutura de Simulação em Tempo Real baseada na IEC 61850-90-1*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2020. 55
- 37 GUERRERO, C. A. V. *Uso do RTDS em Testes de Esquemas de Teleproteção Aplicando o Padrão IEC 61850*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2011. 55