



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO OLIVEIRA RODRIGUES

ESTUDO DE IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE
TRANSFORMADORES DE CORRENTE

FORTALEZA

2016

RODRIGO OLIVEIRA RODRIGUES

**ESTUDO DE IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE
TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Ph.D. Ruth Pastôra Saraiva Leão.

Coorientador: Prof. M.Sc. Raimundo Furtado Sampaio.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R616e Rodrigues, Rodrigo Oliveira.
Estudo de Identificação e Análise de Superação de Transformadores de Corrente / Rodrigo Oliveira Rodrigues. – 2016.
125 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.
Orientação: Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão.
Coorientação: Prof. Me. Raimundo Furtado Sampaio.
1. Transformador de Corrente. 2. Sistema Elétrico de Potência. 3. Saturação. 4. ATP. 5. PROSUPER. I.
Título.

CDD 621.3

RODRIGO OLIVEIRA RODRIGUES

**ESTUDO DE IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE SUPERÇÃO DE
TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Ph.D. Ruth Pastôra Saraiva Leão (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Raimundo Furtado Sampaio (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Marcus Superbus de Medeiros
Companhia Energética do Ceará (Coelce)

A Deus.

À minha família.

A todos os amigos.

AGRADECIMENTOS

Refiro-me, primeiramente, a Deus pelo dom da vida e pela força concedida nos momentos difíceis. Sem Sua presença fiel e incontestável, este e nenhum outro projeto poderiam ser concluídos com êxito.

À minha família, em especial aos meus pais, Laedes de Oliveira Rodrigues e Francisco Rogério Rodrigues, pelo amor incondicional e por todo o incentivo dado durante a minha formação, ao meu irmão, Raphael de Oliveira Rodrigues, que sempre foi referência e inspiração em meus estudos e à minha namorada, Gabriela Rocha Lima, pela paciência e compreensão dos momentos de ausência.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC), com destaque à Profa. Ph.D. Ruth Pastôra Saraiva Leão pela atenção e orientação concisas durante a realização deste projeto, ao Prof. M.Sc. Raimundo Furtado Sampaio pelas incontáveis contribuições concedidas e ao Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco pelas análises das revisões e pela disponibilidade em poder participar da banca examinadora.

À Companhia Energética do Ceará (Coelce), sobretudo ao Eng. Marcus Superbus de Medeiros, pelo espaço e ajuda profissional. Sob sua supervisão e coordenação, tive a oportunidade de vivenciar os diversos âmbitos do dia-a-dia empresarial.

A todos os amigos que tive o prazer de conhecer durante a vida acadêmica e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, nesta longa jornada.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

No Brasil, a rápida evolução do Sistema Elétrico de Potência (SEP), em especial do Sistema Interligado Nacional (SIN), vem causando um aumento significativo das solicitações elétricas sobre os equipamentos das instalações. Em particular, os transformadores de corrente (TCs) são equipamentos sensíveis a essas mudanças e seus núcleos não devem saturar para correntes de elevado valor, tais como as que se desenvolvem durante a ocorrência de um defeito no sistema. Este trabalho tem por objetivo apresentar, a partir de um procedimento predefinido, os critérios para análise de superação de TCs e desenvolver uma aplicação para facilitar o processo de avaliação desses equipamentos. Os efeitos da saturação do núcleo do TC foram amplamente analisados com o auxílio do ATP (*Alternative Transient Program*), caracterizando os impactos provocados na forma de onda da corrente no secundário. A seguir, são apresentadas as técnicas de identificação e análise da superação de TCs de acordo com a metodologia indicada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essas técnicas são capazes de informar o grau de adequação do equipamento ao ponto de instalação, além de fundamentar as bases teóricas para uma eventual tomada de decisão. É proposta uma ferramenta computacional em linguagem de programação Java, denominada PROSUPER (Programa de Análise de Superação), com o intuito de simplificar o tratamento quantitativo das grandezas analisadas pelos agentes do sistema. Essa ferramenta possibilita a avaliação do TC sob os aspectos da suportabilidade de corrente simétrica e assimétrica e da verificação de desempenho. Um estudo de caso foi desenvolvido considerando o sistema elétrico da Companhia Energética do Ceará (Coelce) para demonstrar a análise. Este estudo foi apresentado segundo duas abordagens: na primeira, a avaliação de superação foi realizada com a exposição das equações estabelecidas na teoria; na segunda, a análise foi processada a partir do PROSUPER, e os resultados obtidos foram comparados para validar a aplicação desenvolvida. Foi verificado que a assimetria da corrente de falta é um fator decisivo nas análises de superação de TCs e que, dependendo da relação X/R no ponto de defeito, o TC poderá saturar para correntes de curtos-circuitos mesmo abaixo de 20 vezes a corrente nominal.

Palavras-chave: Transformador de Corrente. Sistema Elétrico de Potência. Saturação. ATP. PROSUPER.

ABSTRACT

In Brazil, the quick evolution of the Electrical Power System (EPS), especially of the National Interconnected System (SIN), has caused a significant increase in electrical demands on the equipment of the facilities. In particular, the current transformer's (CTs) are sensitive equipment and such changes should not lead to the transformer core saturation under high currents, such as those that develop during the occurrence of a fault in the system. This work aims to present, from a predefined procedure, the criteria for analysis of CTs overcoming and to develop an application to facilitate the evaluation's process of these equipment. The effects of the CT core saturation were widely analyzed with the help of ATP (Alternative Transient Program), characterizing the impacts on the waveform of the current in the secondary. The identification techniques and analysis of overcoming of CTs according to the methodology indicated by the Nation Electric System Operator (ONS) are shown. These techniques are able to report the degree of compliance of the equipment to the point of installation, and support the theoretical basis for a possible decision-making. It is proposed a computational tool in Java programming language, called PROSUPER (Overcoming Analysis Program), in order to simplify the quantitative treatment of magnitudes analyzed by the system agents. This tool makes possible the evaluation of CT under aspects of supportability of symmetrical and asymmetrical current and performance verification. A case study was developed considering the electrical system of the Energy Company of Ceará (Coelce) to demonstrate the analysis. This study was presented in two approaches: first, the evaluation of overcoming was performed with the exposure of equations established in theory, in the second, the analysis was performed from PROSUPER, and the results were compared to validate the developed application. It was verified that the fault current asymmetry is a decisive factor in the analysis of CTs overcoming and that, depending on the X/R ratio at the point of fault, the CT may enter into saturation for short-circuit currents under 20 times the nominal current.

Keywords: Current Transformer. Electric Power System. Saturation. ATP. PROSUPER.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– TC classe 17,5 kV com isolamento a seco.....	26
Figura 2	– TC classe 72,5 kV com isolamento a óleo mineral.....	27
Figura 3	– Modelo do circuito equivalente completo do TC.....	28
Figura 4	– Modelo do circuito equivalente simplificado do TC.....	29
Figura 5	– Curva de excitação de um TC 10B200 ajustado em 1200-5 A.....	39
Figura 6	– Tensão no ponto de joelho segundo a norma ANSI/IEEE.....	40
Figura 7	– Tensão no ponto de joelho segundo a norma IEC.....	41
Figura 8	– Tensão de saturação segundo a norma ANSI/IEEE.....	42
Figura 9	– Lista de componentes predefinidos do ATPDraw.....	45
Figura 10	– Circuito de teste do indutor não linear <i>Type 93</i>	46
Figura 11	– Corrente no elemento <i>Type 93</i> em tensão abaixo do ponto de joelho.....	46
Figura 12	– Corrente no elemento <i>Type 93</i> em tensão acima do ponto de joelho.....	47
Figura 13	– Modelo do TC no ATP com o indutor não linear <i>Type 93</i>	47
Figura 14	– Sistema simplificado utilizado para o estudo dos efeitos de saturação.....	48
Figura 15	– Tensões de regime permanente das fases A, B e C.....	49
Figura 16	– Correntes de regime permanente das fases A, B e C.....	49
Figura 17	– Tensões na condição de curto-circuito fase-terra na fase A.....	49
Figura 18	– Correntes na condição de curto-circuito fase-terra na fase A.....	50
Figura 19	– Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 0,3 \Omega$	50
Figura 20	– Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 3 \Omega$	51
Figura 21	– Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 5 \Omega$	51
Figura 22	– Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 10 \Omega$	51
Figura 23	– Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx 0$	53
Figura 24	– Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx -\pi/6$	53
Figura 25	– Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx -\pi/3$	53
Figura 26	– Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx -\pi/2$	54
Figura 27	– Efeito da saturação em relés de sobrecorrente de tempo inverso.....	55
Figura 28	– Visão geral dos critérios de superação de TCs.....	58
Figura 29	– Contribuição das correntes de curto-circuito para falta na barra.....	60
Figura 30	– Contribuição das correntes de curto-circuito para falta terminal.....	61

Figura 31	– Contribuição das correntes de curto-circuito para condição de <i>line-out</i>	61
Figura 32	– Levantamento das cargas secundárias para falta trifásica.....	67
Figura 33	– Levantamento das cargas secundárias para falta monofásica.....	67
Figura 34	– Fluxograma operacional do PROSUPER.....	71
Figura 35	– Tela de inicialização do PROSUPER.....	71
Figura 36	– Tela de cadastro de dados dos TCs.....	72
Figura 37	– Tela de cadastro de dados do sistema.....	74
Figura 38	– Resumo dos dados para a Avaliação simplificada.....	75
Figura 39	– Tela de resultados da Avaliação simplificada.....	76
Figura 40	– Resumo dos dados para a Avaliação completa.....	76
Figura 41	– Tela de resultados da Avaliação completa.....	77
Figura 42	– Esquema de barras gerado pelo Plotter.....	78
Figura 43	– Tela da ferramenta de cálculo dos parâmetros nominais.....	79
Figura 44	– Diagrama unifilar operacional simplificado da SED MCP.....	81
Figura 45	– Registro de dados do TC 01Z1 da SED MCP.....	96
Figura 46	– Registro de dados do sistema no ponto de conexão.....	96
Figura 47	– Resultados da análise do TC 01Z1.....	97
Figura 48	– Resultados da análise do TC 01Z1 no Plotter.....	98
Figura 49	– Curva de excitação típica do TC.....	107
Figura 50	– Placa de identificação do TC 01Z1 da SED MCP.....	122
Figura 51	– Placa de identificação do TC 01Z2 da SED MCP.....	123

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução do valor médio da corrente de curto-circuito das barras do SIN.....	21
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Simbologia para representação de correntes e relações nominais.....	30
Tabela 2	– Níveis de isolamento para $U_{MAX} \leq 242 \text{ kV}$	32
Tabela 3	– Cargas nominais com fator de potência de 0,5.....	33
Tabela 4	– Aplicação dos TCs quanto à exatidão.....	34
Tabela 5	– Valores de ajuste para o relé de sobrecorrente.....	55
Tabela 6	– Impedância de cabos utilizados no secundário de TCs.....	85
Tabela 7	– Resultados dos casos rodados no ANAFAS.....	86
Tabela 8	– Valores de ajuste da função 51N para o relé associado ao TC 01Z1.....	87
Tabela 9	– Percentual de superação do TC 01Z1 da SED MCP.....	95
Tabela 10	– Comparando os resultados dos métodos de análise.....	98
Tabela 11	– Percentual de superação do TC 01Z1 da SED MCP para falta na barra.....	99
Tabela 12	– Percentual de superação do TC 01Z1 da SED MCP para falta terminal.....	100
Tabela 13	– Percentual de superação do TC 01Z1 classe 10B400 para falta na barra.....	101
Tabela 14	– Percentual de superação do TC 01Z1 classe 10B400 para falta terminal.....	101
Tabela 15	– Relação $E_S - I_E$ para levantamento da curva de excitação típica do TC.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
UFC	Universidade Federal do Ceará
Coelce	Companhia Energética do Ceará
TC	Transformador de Corrente
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROSUPER	Programa de Análise de Superação
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
TMS	<i>Time Multiplier Setting</i>
MI	Muito Inversa
GT-AS	Grupo de Trabalho para Análise da Superação de Equipamentos de AT
AT	Alta Tensão
PAR	Plano de Ampliação e Reforços
RB	Rede Básica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
SED	Subestação de Distribuição
MCP	Mucuripe
DMG	Delmiro Gouveia
OAP	Ordem de Ajuste da Proteção

ONAN	Óleo Natural, Ar Natural
ONAF1	Óleo Natural, Ar Forçado (primeiro estágio)
ONAF2	Óleo Natural, Ar Forçado (segundo estágio)
NI	Normal Inversa
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória

LISTA DE SÍMBOLOS

R_1	Resistência do enrolamento primário
X_1	Reatância do enrolamento primário
R_2	Resistência do enrolamento secundário
X_2	Reatância do enrolamento secundário
R_M	Resistência de perdas
X_M	Reatância de magnetização
R_B	Resistência nominal da carga
X_B	Reatância nominal da carga
I_{1N}	Corrente primária nominal
I_{2N}	Corrente secundária nominal
RTC	Relação de transformação
FS	Fator de sobrecorrente
Z_{2N}	Impedância secundária nominal
U_{MAX}	Tensão máxima do equipamento
NI	Nível de isolamento
f	Frequência nominal
Ft	Fator térmico nominal
Ft_i	Fator térmico das outras relações nominais
Ft_1	Fator térmico da menor relação nominal
RTC_1	Menor relação nominal
RTC_i	Outras relações nominais
I_t	Corrente suportável nominal de curta duração ou corrente térmica
I_d	Valor de crista nominal da corrente suportável ou corrente dinâmica
B	Densidade de fluxo magnético
H	Intensidade de campo magnético
E_S	Tensão secundária de excitação
I_E	Corrente de excitação do núcleo
V_K	Tensão no ponto de joelho da curva de excitação
V_{SAT}	Tensão de saturação
R	Resistência genérica
L	Indutância genérica

i	Corrente genérica
λ	Fluxo enlaçado genérico
V	Tensão eficaz genérica
I	Corrente eficaz genérica
<i>SOURCE</i>	Fonte de tensão
<i>RI</i>	Resistor de interligação
<i>LOAD A</i>	Carga da fase A
<i>LOAD B</i>	Carga da fase B
<i>LOAD C</i>	Carga da fase C
<i>RF</i>	Resistência de falta
t	Instante de tempo
i_f	Corrente de curto-circuito
I_m	Amplitude da corrente
ω	Velocidade angular
φ	Ângulo de fase da tensão
θ	Ângulo do fator de potência
τ	Constante de tempo primária
V_m	Amplitude da tensão
X	Reatância genérica
X/R	Relação X/R no curto-circuito
β	Constante de temporização do relé
<i>TMS</i>	Índice de tempo
I_{PICKUP}	Valor eficaz da corrente de pick-up
α	Expoente de temporização do relé
<i>TAPE</i>	Valor da corrente de ajuste do relé
I_{mL}	Corrente máxima de regime permanente
I_{CS}	Corrente de curto-circuito simétrica
I_{CA}	Corrente de curto-circuito assimétrica
I_{mCA}	Valor máximo da corrente de curto-circuito assimétrica
V_{CS}	Tensão secundária de falta simétrica
E_{AL}	Tensão secundária de falta assimétrica
K_{td}	Fator de dimensionamento transitório
ζ	Constante de tempo secundária

t_{CO}	Tempo de atuação da proteção no primeiro ciclo
L_M	Indutância de magnetização
L_B	Indutância da carga
R_{CABO}	Resistência do cabo
$R_{RELÉ-FASE}$	Resistência do relé de fase
$R_{RELÉ-NEUTRO}$	Resistência do relé de neutro
t_{mKtd}	Tempo correspondente ao valor máximo de K_{td}
t_{FR}	Tempo morto
t_{COCO}	Tempo de atuação da proteção no segundo ciclo
Z_{RELAY}	Impedância do relé
VA_{RELAY}	Carga em VA do relé
d	Distância
$R_{\Omega km}$	Resistência em Ω/km
S_{ONAF2}	Potência aparente sob ONAF2
V_{BS}	Tensão secundária de base
PER_1	Percentual de superação para o primeiro critério
PER_2	Percentual de superação para o segundo critério
PER_3	Percentual de superação para o terceiro critério
PER_4	Percentual de superação para o quarto critério
PER_5	Percentual de superação para o quinto critério

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Justificativa do trabalho.....	23
1.2	Objetivos do trabalho.....	23
1.3	Estrutura do trabalho.....	23
2	TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	25
2.1	Características construtivas.....	25
2.2	Classificação geral.....	27
2.2.1	<i>TC para serviço de medição.....</i>	<i>27</i>
2.2.2	<i>TC para serviço de proteção.....</i>	<i>28</i>
2.3	Características elétricas.....	28
2.3.1	<i>Correntes nominais.....</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>Relações nominais.....</i>	<i>30</i>
2.3.3	<i>Fator de sobrecorrente.....</i>	<i>31</i>
2.3.4	<i>Tensão secundária nominal.....</i>	<i>31</i>
2.3.5	<i>Tensão máxima do equipamento e níveis de isolamento.....</i>	<i>31</i>
2.3.6	<i>Frequência nominal.....</i>	<i>33</i>
2.3.7	<i>Cargas nominais.....</i>	<i>33</i>
2.3.8	<i>Exatidão.....</i>	<i>33</i>
2.3.9	<i>Número de núcleos para medição e proteção.....</i>	<i>35</i>
2.3.10	<i>Fator térmico nominal.....</i>	<i>35</i>
2.3.11	<i>Corrente suportável nominal de curta duração.....</i>	<i>36</i>
2.3.12	<i>Valor de crista nominal da corrente suportável.....</i>	<i>37</i>
2.3.13	<i>Uso.....</i>	<i>37</i>
2.4	Condições desfavoráveis de operação.....	37
3	PROBLEMA DA SATURAÇÃO.....	38
3.1	Saturação do TC.....	38
3.1.1	<i>Curva de excitação.....</i>	<i>38</i>
3.1.2	<i>Tipos de saturação.....</i>	<i>42</i>
3.1.3	<i>Fatores que influenciam na saturação.....</i>	<i>43</i>
3.2	Modelos de simulação computacional.....	43
3.2.1	<i>O ATP.....</i>	<i>43</i>

3.2.2	<i>Construindo um modelo no ATP</i>	45
3.2.3	<i>Resposta em regime de saturação</i>	48
3.3	Efeitos da saturação do TC.....	54
3.4	Medidas para reduzir ou evitar os efeitos da saturação.....	55
4	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	57
4.1	Contextualização.....	57
4.2	Aspectos de saturação.....	58
4.2.1	<i>Suportabilidade de corrente simétrica e assimétrica</i>	59
4.2.2	<i>Verificação de desempenho</i>	62
4.3	Considerações aos critérios de avaliação.....	69
5	PROSUPER	70
5.1	Idealização do programa.....	70
5.2	Arranjo operacional.....	70
5.3	Registro de dados.....	72
5.3.1	<i>Dados do equipamento</i>	72
5.3.2	<i>Dados do sistema</i>	73
5.4	Módulos de simulação.....	74
5.4.1	<i>Avaliação simplificada</i>	75
5.4.2	<i>Avaliação completa</i>	76
5.5	Métodos de obtenção dos resultados.....	77
5.5.1	<i>O Plotter</i>	78
5.5.2	<i>Relatório técnico de análise</i>	78
5.6	Ferramenta de cálculo dos parâmetros nominais.....	79
5.7	Validando a aplicação desenvolvida.....	79
6	ESTUDO DE CASO	81
6.1	Identificação do problema.....	81
6.2	Levantamento de dados para o estudo.....	82
6.2.1	<i>Dados do equipamento</i>	82
6.2.2	<i>Dados do sistema</i>	85
6.3	Crítérios de avaliação.....	88
6.3.1	<i>Suportabilidade de corrente simétrica e assimétrica</i>	88
6.3.2	<i>Verificação de desempenho</i>	91
6.4	Síntese dos resultados teóricos.....	94

6.5	Resultados obtidos do PROSUPER.....	95
6.5.1	Registro de dados.....	95
6.5.2	Módulo de simulação.....	97
6.5.3	Comparando os resultados.....	98
6.6	Outras hipóteses de avaliação.....	99
6.6.1	Falta na barra.....	99
6.6.2	Falta terminal.....	99
6.6.3	Discussão dos resultados.....	100
6.7	Medidas mitigadoras.....	100
7	CONCLUSÃO.....	102
7.1	Propostas para trabalhos futuros.....	103
	REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE A	– DADOS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE.....	106
APÊNDICE B	– LISTAGEM DO ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP PARA O CIRCUITO DE TESTE DO INDUTOR NÃO LINEAR <i>TYPE 93</i>	108
APÊNDICE C	– LISTAGEM DO ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP PARA O SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO.....	110
APÊNDICE D	– RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA MONOFÁSICA NA BARRA MCP 9024.....	113
APÊNDICE E	– RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA TRIFÁSICA NA BARRA MCP 9024.....	115
APÊNDICE F	– RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA MONOFÁSICA SOB A CONDIÇÃO DE <i>LINE-OUT</i>	117
APÊNDICE G	– RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA TRIFÁSICA SOB A CONDIÇÃO DE <i>LINE-OUT</i>	118
APÊNDICE H	– RELATÓRIO TÉCNICO EMITIDO PELO PROSUPER PARA O ESTUDO DE CASO.....	119
ANEXO A	– PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE.....	122

1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos elétricos de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) devem ser especificados para operar de forma adequada sem prejuízo de desempenho, eficiência e período de vida útil. Como resultado, devem ser dimensionados de forma a tolerar as eventuais expansões que venham a ocorrer no sistema durante esse período, sem que haja superação precoce de suas características nominais. O termo superação significa que as condições nominais de operação do equipamento foram excedidas.

A conjuntura atual do setor elétrico brasileiro – crescimento da demanda, escassez de oferta e restrições financeiras, socioeconômicas e ambientais à expansão do sistema nos seguimentos convencionais – indica que o suprimento futuro de energia elétrica exigirá uma parcela cada vez maior sobre o aproveitamento de fontes alternativas. As mudanças na legislação do setor elétrico que visa, entre outras coisas, maior competitividade no setor de geração, têm como consequência a viabilização de novos empreendimentos em prazos relativamente curtos. As novas fontes muitas vezes se conectam ao Sistema Interligado Nacional (SIN) em pontos não considerados originalmente pelo planejamento de longo prazo.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2013), uma consequência direta dessa expansão da geração é a elevação dos níveis de curto-circuito em diversas subestações, podendo, em muitos casos, ocasionar a superação de seus equipamentos. O Gráfico 1 apresenta a evolução da média da corrente de curto-circuito de 2007 a 2015 nas subestações do SIN. Os resultados apresentados no gráfico baseiam-se nos casos de referência de curtos-circuitos elaborados pelo ONS.

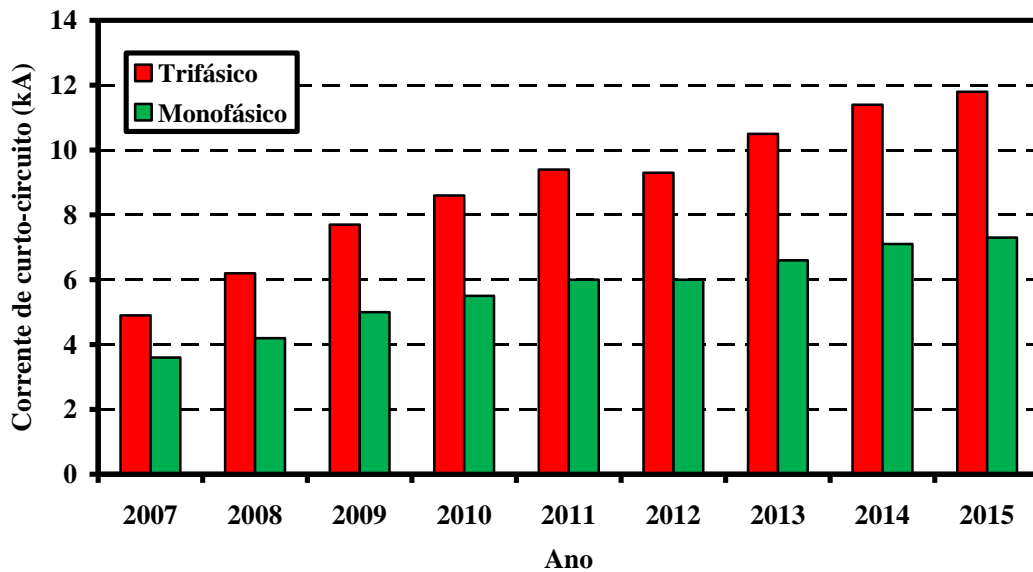
O conhecimento prévio das solicitações aos quais os equipamentos possam estar submetidos é fundamental para o projeto das instalações. Adequar determinado equipamento a uma unidade requer a compreensão do histórico de patamares das tensões e correntes da rede. O rápido avanço do sistema, neste sentido, torna imprescindível o acompanhamento contínuo dessas grandezas.

Dentre os vários equipamentos que integram as instalações de um SEP, têm-se os transformadores de corrente (TCs), usados para produzir uma corrente alternada em seu terminal secundário, a qual é proporcional à corrente CA do primário. Os TCs podem ser classificados por sua aplicação em dois tipos: medição e proteção. Os TCs de medição devem reproduzir a corrente de operação de estado permanente e, em geral, a corrente do circuito primário não é maior que a corrente nominal. Os TCs de proteção devem reproduzir a corrente de curto-circuito para fornecer o sinal de controle aos dispositivos de proteção do

SEP. A corrente de curto-circuito pelos TCs de proteção pode ser dez ou mais vezes maior que a corrente nominal, e, usualmente, a forma de onda da corrente deve ser obtida, uma vez que os dispositivos de proteção operam baseados na forma de onda transitória da corrente de falta.

Como transdutor, os TCs permitem que os instrumentos de proteção e medição associados a esse equipamento sejam dimensionados em tamanhos reduzidos com as bobinas de corrente constituídas de pouca quantidade de cobre.

Gráfico 1 – Evolução do valor médio da corrente de curto-circuito das barras do SIN



Fonte: Adaptado de Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013).

Para operar de maneira satisfatória, no entanto, os TCs devem ser especificados de forma a evitar o estado de saturação de seu núcleo. Caso contrário, os sinais de corrente recebidos pelos relés de proteção estariam mascarados, provocando, assim, uma operação inadequada e imprevisível do sistema elétrico.

A saturação do núcleo de TC é um dos problemas críticos no desenvolvimento de abordagens de proteção confiáveis. As técnicas de identificação e análise de superação de TCs existentes são bastante exaustivas quando aplicadas em um sistema elétrico real composto de centenas destes equipamentos. A necessidade do acompanhamento das condições de operação de TCs torna conveniente o desenvolvimento de um *software* para simplificar a aplicação dos métodos de avaliação, além de permitir o armazenamento destas informações em bancos de dados virtuais para embasar tomadas de decisões futuras.

Diversos trabalhos foram publicados tratando do problema da saturação bem como do desempenho dos TCs em regime transitório. Os pesquisadores Marshall e Langguth (1929 *apud* COELHO, 2011a) foram uns dos precursores no estudo dos erros provocados pela excitação anormal do TC, além de indicarem estratégias a serem utilizadas para minimizar esses erros.

Schettino (2012) apresenta um método denominado função primeira diferença do filtro de Lanczos para detecção da saturação do TC. Além disso, o autor utiliza o método de estimação para modelos lineares na compensação dos efeitos causados pela saturação. Ambos os métodos foram implementados em MATLAB e testados em correntes distorcidas geradas através de um modelo de TC operando na região de saturação e através de simulações realizadas em um *Real Time Digital Simulator* (RTDS).

Coelho (2011a) discute o problema da saturação de TCs no desempenho de relés de proteção, apresentando duas metodologias para analisar os efeitos na reposta de um relé numérico comercial. Um modelo de TC é implementado matematicamente em MATLAB no primeiro método. No segundo, uma análise similar é realizada utilizando-se o RTDS. Fazendo uso das duas ferramentas, o autor investiga o comportamento transitório de TCs e os fatores que levam o seu núcleo a saturar.

Roselli (2007) utiliza uma metodologia de correção dos sinais distorcidos baseada em Redes Neurais Artificiais (RNA). A partir de simulações em MATLAB contendo a modelagem dos canais de transdução de tensão e corrente de um sistema típico de proteção de distância, foram obtidos resultados que permitiram ao autor definir a arquitetura e realizar o treinamento da RNA.

Coelho (2011b) avalia as diretrizes relacionadas à especificação de TCs, julgando considerações assumidas frente às simplificações teóricas. O autor descreve ainda os métodos propostos por diferentes literaturas com relação ao ensaio da curva de excitação, conhecida também como característica de saturação do TC.

Sawko (2003) investiga os fatores que podem afetar a precisão das medidas de corrente, destacando os impactos provocados pelo *burden* secundário e pela relação X/R no ponto de defeito. Para isso, foram conduzidas simulações com o uso do *Electromagnetic Transient Program* (EMTP).

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta o estudo dos critérios de análise da superação de TCs conforme a metodologia admitida pelo ONS. Ademais, é proposta uma ferramenta computacional em linguagem de programação Java que facilita o árduo processo

de avaliação de TCs. O estudo de caso investigado é baseado em um sistema real da rede de distribuição do Ceará.

1.1 Justificativa do trabalho

Pelo exposto, fica evidente a importância do monitoramento das condições da rede elétrica e dos equipamentos no ponto de instalação dos TCs, uma vez que o pleno funcionamento dos sistemas de proteção está intimamente ligado à capacidade de resposta destes, mesmo nas circunstâncias mais severas de atuação. É necessário, portanto, um dimensionamento preciso dos TCs, considerando, durante o estudo, tanto condições normais e de emergência, como situações futuras de operação da rede.

É necessário ainda que a avaliação de superação de TCs se torne um procedimento acessível a todos os profissionais da área de proteção do SEP. O desenvolvimento de ferramentas computacionais, desta forma, é justificado no sentido de garantir maior eficiência e rapidez das análises.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo avaliar e empregar as técnicas de análise da superação de TCs em um sistema de distribuição real e propor a aplicação do *software* PROSUPER como ferramenta de avaliação, simplificando a metodologia praticada pelo Operador.

1.3 Estrutura do trabalho

Além deste capítulo introdutório, no qual é feita uma apresentação geral do assunto abordado, evidenciando a justificativa e os objetivos do estudo, este trabalho é composto por mais seis capítulos.

No Capítulo 2 são introduzidos os conceitos fundamentais de TCs, a classificação, a representação pelo circuito equivalente e os parâmetros necessários para o entendimento do seu princípio de funcionamento. São apresentadas, ainda, as definições segundo as normas ABNT, ANSI/IEEE e IEC, e suas particularidades.

No Capítulo 3 são apresentados os problemas relacionados à saturação do núcleo dos TCs, no qual são constatadas suas causas e consequências mais comuns. Neste capítulo,

são apresentadas, ainda, as simulações e os casos rodados com o auxílio do ATP, pondo em evidência as características da corrente secundária do TC em condição de saturação.

No Capítulo 4 é desenvolvido o embasamento teórico dos critérios para o estudo de identificação e análise da superação de TCs. A metodologia exposta no capítulo segue as premissas estabelecidas pelo ONS.

No Capítulo 5 é apresentado o PROSUPER, sua estrutura, funcionamento e a apresentação dos resultados dentro da ferramenta. Neste capítulo, são abordados os passos de configuração dos dados, além dos modelos de análise disponíveis no programa.

No Capítulo 6 é desenvolvido um estudo de caso para ilustrar a aplicação dos procedimentos de análise, além de empregar o PROSUPER como ferramenta de avaliação. Os resultados coletados do *software* são relacionados com os obtidos a partir do equacionamento para validar sua aplicabilidade.

No Capítulo 7 são feitas as considerações finais do trabalho, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Caminha (1977) exprime que em razão das elevadas correntes envolvidas em um SEP, é necessária a redução dessas magnitudes com a finalidade de monitorar o sistema a partir de valores suportáveis pela aparelhagem, tais como medidores e relés de proteção. Neste sentido, os TCs são transformadores de instrumentos que permitem aos equipamentos de medição e proteção ligados em seu secundário o funcionamento adequado sem a necessidade de correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados.

De maneira geral, os TCs reproduzem proporcionalmente no seu circuito secundário a corrente que circula em um enrolamento primário com sua posição vetorial substancialmente mantida, em uma proporção definida, conhecida e adequada. Como os TCs são empregados para alimentar instrumentos elétricos de baixa impedância (amperímetros, bobinas de corrente de wattímetros, bobinas de corrente de medidores de energia elétrica e relés de corrente), diz-se que são transformadores de força que funcionam quase em curto-circuito.

Quando instalados em um SEP, os TCs têm por finalidade:

- a) Reduzir a magnitude das correntes da rede elétrica para níveis padronizados, permitindo a fabricação compacta dos instrumentos associados;
- b) Isolar os dispositivos de medição, controle e proteção do circuito de potência;
- c) Promover a segurança das pessoas, reduzindo a exposição dos profissionais aos riscos de choque elétrico.

2.1 Características construtivas

Na sua forma mais simples, o TC consiste de um núcleo de material ferromagnético, um enrolamento primário e um enrolamento secundário, estando o enrolamento primário ligado em série com o circuito de carga. O enrolamento primário é composto normalmente de poucas espiras feitas de condutor de grande seção, o que torna insignificante a queda de tensão provocada no sistema, e o enrolamento secundário de várias espiras de condutor fino.

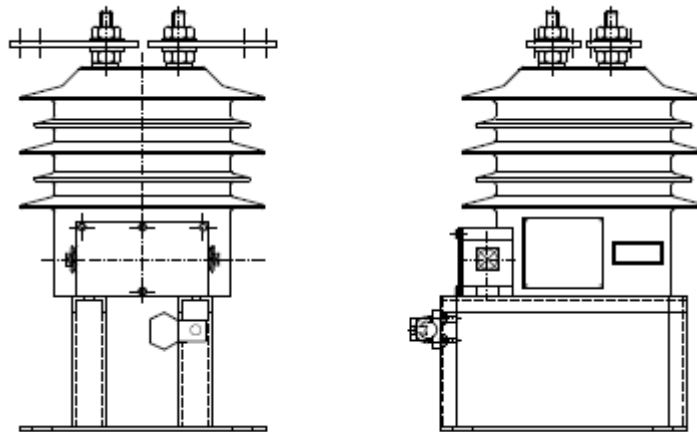
De acordo com Mamede Filho (2013), os TCs empregados na baixa tensão têm, usualmente, núcleo fabricado em ferro-silício de grãos orientados e está, juntamente com os enrolamentos primário e secundário, encapsulado em resina epóxi submetido à polimerização.

TCs especiais, para os quais se exige excelente classe de exatidão, têm o núcleo constituído de chapas de ligas de ferro-níquel. Estas ligas têm alta permeabilidade magnética e perdas reduzidas, mas o seu custo é bem maior que o custo dos núcleos de ferro-silício usuais.

Os TCs de média tensão, tal como os de baixa, são, comumente, construídos em resina epóxi quando designados às instalações abrigadas. Também são encontrados TCs para uso interior fabricados em tanque metálico isolado a óleo mineral e provido de buchas de porcelana vitrificada comum aos terminais de entrada e saída da corrente primária.

A Figura 1 mostra, sob duas perspectivas, o desenho técnico de um TC classe 17,5 kV com isolamento a seco, fabricado para uso exterior.

Figura 1 – TC classe 17,5 kV com isolamento a seco

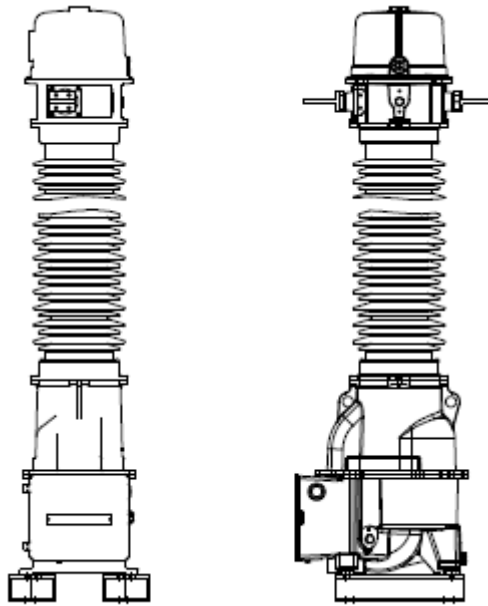


Fonte: Cortesia da Companhia Energética do Ceará.

Os TCs de alta tensão para uso externo são dotados de bucha de porcelana vitrificada com saias, comum aos terminais de entrada da corrente primária. A Figura 2 mostra, sob duas perspectivas, o desenho técnico de um TC classe 72,5 kV isolado a óleo mineral, fabricado para uso exterior.

Os TCs destinados às instalações em tensões iguais ou superiores a 69 kV têm os seus primários envolvidos por uma blindagem eletrostática, cuja finalidade é uniformizar a distribuição dos potenciais. Estas camadas de material condutor são ligadas entre si e também a um terminal externo, o qual deve ser interligado à malha de aterramento.

Figura 2 – TC classe 72,5 kV com isolamento a óleo mineral



Fonte: Cortesia da Companhia Energética do Ceará.

2.2 Classificação geral

De maneira geral, os TCs podem ser classificados de acordo com sua finalidade. Existem dois tipos fundamentais: um para fim de medição e outro para fim de proteção. Ambos os tipos devem reproduzir fielmente a corrente primária de interesse, sem danificar os dispositivos instalados no circuito secundário.

Usualmente, os TCs são construídos com vários núcleos, uns destinados aos serviços de medição de energia e outros próprios para serviço de proteção. Apesar de formarem um mesmo equipamento, as características de cada núcleo são distintas e por isso devem ser tratadas separadamente.

2.2.1 TC para serviço de medição

Os TCs utilizados para fim de medição devem possuir características tais que mantenham uma alta exatidão nas correntes de carga, podendo, entretanto, apresentar erros significativos para elevadas correntes de falta.

2.2.2 TC para serviço de proteção

Os TCs utilizados para fins de proteção são projetados para que apresentem erros relativamente pequenos mesmo durante condições de curtos-circuitos. Em outras palavras, este tipo de TC deverá manter a sua classe de exatidão, desde a corrente nominal até 20 vezes esta corrente.

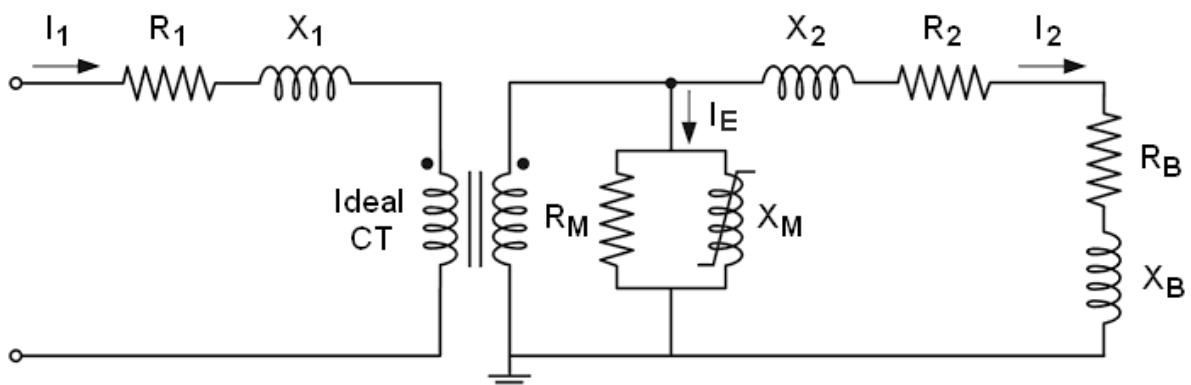
Tendo em vista a impedância do enrolamento secundário, os TCs para serviço de proteção se subdividem em duas classes, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992):

- a) Classe A: TC que possui alta impedância interna, ou seja, aquele cuja reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor considerável frente à impedância total do circuito secundário, quando este alimenta sua carga nominal;
- b) Classe B: TC que possui baixa impedância interna, isto é, aquele cuja reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor insignificante frente à impedância total do circuito secundário, quando este alimenta sua carga nominal.

2.3 Características elétricas

Os TCs podem ser representados através do esquemático da Figura 3, em que as resistências e reatâncias do enrolamento primário estão definidas como R_1 e X_1 , as resistências e reatâncias do enrolamento secundário como R_2 e X_2 e o ramo de magnetização está caracterizado por dois parâmetros, a resistência R_M e a reatância X_M .

Figura 3 – Modelo do circuito equivalente completo do TC



Fonte: Adaptado de Martinez-Velasco (2015).

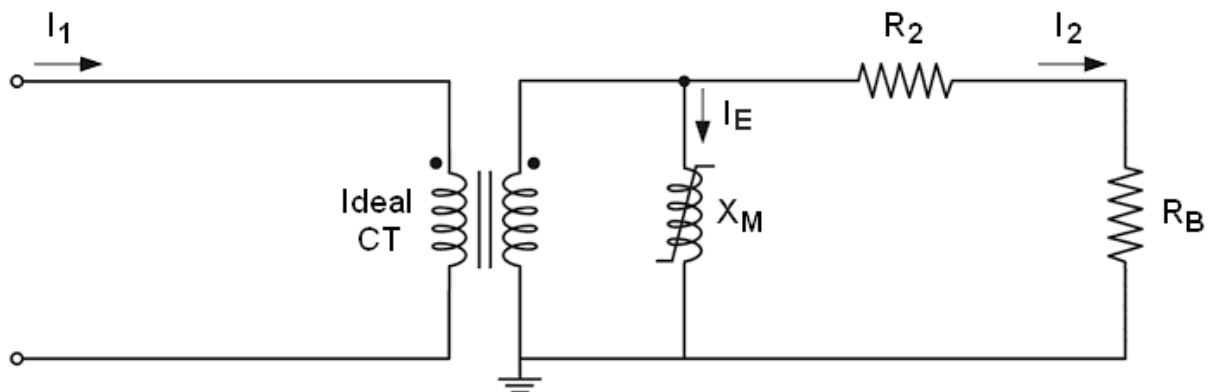
Como a queda de tensão provocada pelo enrolamento primário é praticamente desprezível, em muitos casos é possível omitir a resistência R_1 e a reatância de dispersão X_1 do circuito equivalente completo. Além disso, em relação ao enrolamento secundário, o valor da resistência R_2 supera em muitas vezes o valor da reatância X_2 .

No modelo da Figura 3, o parâmetro R_M , que representa a resistência de perdas magnéticas desenvolvidas através das correntes de histerese e de Foucault, pode ser considerado constante. A mesma consideração, entretanto, não pode ser feita para a reatância de magnetização X_M , que deve ser especificada como função da corrente de excitação.

No esquemático da Figura 3, ainda estão representados R_B e X_B , que definem a resistência e a reatância da carga conectada nos terminais secundários, respectivamente. Segundo Martinez-Velasco (2015), dispositivos de proteção baseados em microprocessadores modernos (carga do TC) têm uma reatância muito baixa em relação ao valor da resistência, podendo ser ignorada em determinadas avaliações. Esta consideração, porém, não deve ser tomada como verdade para relés eletromecânicos, os quais apresentam reatâncias significativas no valor da impedância total da carga.

Sendo possível aceitar tais simplificações, o circuito equivalente da Figura 3 toma a forma do modelo equivalente mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Modelo do circuito equivalente simplificado do TC



Fonte: Adaptado de Martinez-Velasco (2015).

Os TCs possuem suas características padronizadas, cujas especificações seguem regras determinadas por normas técnicas. Neste trabalho, foram adotadas as seguintes:

- a) ABNT NBR 6856:1992;
- b) IEEE Std. C57.13:1993;
- c) IEC 60044-1:2003.

Apesar de haver versões atualizadas das normas ABNT e IEEE, dado o enfoque deste trabalho ao estudo de caso presente no Capítulo 6, foram consideradas as definições prescritas nas normas citadas anteriormente, uma vez que as terminologias apresentadas continuam válidas para a aplicação dos critérios de avaliação da superação. As características relacionadas aos TCs, significativas para a compreensão dessas análises, são tratadas a seguir.

2.3.1 Correntes nominais

No Brasil, geralmente, os TCs são projetados e construídos para uma corrente secundária nominal (I_{2N}) padronizada em 5 A e correntes primárias nominais (I_{1N}) na faixa de 5 A a 8000 A, estabelecidas de acordo com a ordem de grandeza da corrente de carga do circuito primário.

Em alguns casos especiais, quando os aparelhos, normalmente relés de proteção, são instalados distantes dos TCs, podem ser utilizadas correntes secundárias nominais de 1 A e 2 A, a fim de reduzir a queda de tensão nos fios de interligação, de acordo com Mamede Filho (2013).

2.3.2 Relações nominais

É a relação entre os valores nominais das correntes primária e secundária. A Tabela 1 resume a simbologia adotada para definir as relações de correntes.

Tabela 1 – Simbologia para representação de correntes e relações nominais

Descrição	Símbolo	Função	Aplicação
Dois pontos	:	Representar relações nominais	120:1 240:1
Hífen	-	Separar correntes nominais e relações nominais de enrolamentos diferentes	600-5 A 1200-5-5 A
X	x	Separar correntes nominais e relações nominais obtidas por religação em série ou em paralelo	600x1200 A 120x240:1
Barra	/	Separar correntes nominais e relações nominais obtidas por derivações secundárias	400/600 A 800/1200 A
Duas barras	//	Separar correntes nominais e relações nominais obtidas por derivações primárias	200//300 A 400//600 A

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992).

As relações disponíveis são indicadas pelo fabricante na placa de identificação do TC. A razão entre a corrente primária nominal (I_{1N}) e a corrente secundária nominal (I_{2N}), também chamada de relação de transformação nominal ou, simplesmente, relação de transformação (RTC), é um parâmetro fundamental no cálculo do desempenho de TCs.

2.3.3 Fator de sobrecorrente

Segundo Roselli (2007), o fator de sobrecorrente (FS) de um TC é definido pela relação entre a corrente máxima de curto-circuito que pode percorrer seu enrolamento primário e a sua corrente primária nominal. Isto deve ocorrer com a correspondente limitação de erro de sua classe de exatidão. O fator de sobrecorrente para serviço de proteção é, comumente, especificado em 20 vezes a corrente nominal.

2.3.4 Tensão secundária nominal

A tensão secundária nominal é a tensão nos terminais da carga quando aplicada ao TC uma corrente secundária 20 vezes maior que a corrente secundária nominal, sem que o erro de relação exceda o valor especificado. O valor desta tensão é obtido multiplicando-se a impedância secundária nominal (Z_{2N}) por 20 vezes a corrente secundária nominal I_{2N} . As tensões secundárias nominais padronizadas são: 10 V, 20 V, 50 V, 90 V, 100 V, 180 V, 200 V, 360 V, 400 V e 800 V, as quais são baseadas em uma corrente secundária nominal de 5 A, de acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992).

2.3.5 Tensão máxima do equipamento e níveis de isolamento

A tensão máxima do equipamento (U_{MAX}) corresponde ao maior valor eficaz da tensão de linha (tensão entre fases) para o qual o TC é projetado, considerando-se, principalmente, a sua isolação, bem como outras características que podem ser referidas a essa tensão na especificação do equipamento considerado. Essa tensão não é necessariamente igual à tensão máxima de operação do sistema ao qual o equipamento está ligado.

O nível de isolamento (NI) define a especificação do TC quanto às condições a que deve satisfazer a sua isolação em termos de tensão suportável. Os níveis de isolamento padronizados para $U_{MAX} \leq 242 \text{ kV}$ são encontrados na Tabela 2.

O nível de isolamento é representado pelas tensões suportáveis nominais à frequência industrial, de impulso atmosférico e de surtos de manobra que dele fazem parte, de acordo com a respectiva tensão máxima do equipamento. Na ordem indicada, os espaços reservados às tensões suportáveis nominais, que não fazem parte do nível de isolamento, devem ser preenchidos com travessão.

Tabela 2 – Níveis de isolamento para $U_{MAX} \leq 242 \text{ kV}$

Tensão máxima do equipamento U_{MAX} (kV)	Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1 min. (kV)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (kV crista)
0,6	4	–
1,2	10	30
7,2	20	40 60
15	34	95 110
24,2	50	125 150
36,2	70	150 170 200
72,5	140	350
92,4	185	450
145	230 275	550 650
242	360 395	850 950

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992).

2.3.6 Frequência nominal

A frequência nominal (f) é especificada de acordo com a frequência da rede para a qual o TC foi projetado. São normais as frequências de 50 Hz e 60 Hz, sendo esta última o valor designado para TCs em operação no Brasil.

2.3.7 Cargas nominais

Todas as considerações sobre exatidão dos TCs estão condicionadas ao conhecimento da carga dos mesmos. Os manuais de fabricantes de dispositivos de proteção e medição fornecem as cargas, também chamada de *burden*, que os mesmos representam para os TCs. A isto se deve ainda adicionar a carga imposta pela fiação, segundo Coelho (2011).

Por definição, a carga secundária nominal deve ser representada em volt-ampère (VA), sendo esta o produto da impedância da carga nominal Z_{2N} pelo quadrado da corrente secundária nominal I_{2N} . Alguns destes valores são especificados na Tabela 3.

Nessa tabela, observa-se que a carga nominal padronizada é representada pela letra C, seguida do valor numérico desta carga em VA, segundo a ABNT NBR 6856:1992, ou, de acordo com IEEE Std. C57.13:1993, pela letra B seguida de um número que corresponde ao valor da impedância da carga nominal em ohms.

Tabela 3 – Cargas nominais com fator de potência de 0,5

Designação ABNT	Designação IEEE	Potência aparente (VA)	Resistência (Ω)	Reatância indutiva (Ω)	Impedância (Ω)	Tensão secundária nominal (V)
C 25	B-1	25	0,50	0,866	1,0	100
C 50	B-2	50	1,00	1,732	2,0	200
C 100	B-4	100	2,00	3,464	4,0	400
C 200	B-5	200	4,00	6,928	8,0	800

Fonte: Adaptado de Medeiros Filho (1997).

2.3.8 Exatidão

Tal característica corresponde ao erro máximo de transformação esperado, dado em valores percentuais, se a carga padrão especificada for respeitada. A classe de exatidão

exprime nominalmente o erro esperado do TC levando em consideração o erro de relação de transformação e o erro de defasamento entre as correntes primária e secundária.

TCs destinados a serviços de medição e de proteção possuem requisitos distintos para a classe de exatidão. De maneira geral, TCs para serviço de medição devem ser enquadrados em uma das seguintes classes de exatidão: 0,3; 0,6; 1,2 e 3. Por outro lado, TCs para serviço de proteção devem ser enquadrados em uma das seguintes classes: 5 e 10, segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992).

Uma ressalva deve ser feita em relação à classe de exatidão quando esta corresponde a 3. Essa classe não tem limitação de ângulo de fase, razão pela qual não deve ser especificada para serviço de medição de potência ou energia.

A Tabela 4 mostra como selecionar a exatidão adequada para um TC tendo em vista a sua aplicação nas diferentes categorias de medições e proteção.

Tabela 4 – Aplicação dos TCs quanto à exatidão

Classe de exatidão	Aplicação
Menor do que 0,3	Medições em laboratório Medições especiais
0,3	Medição de energia elétrica para faturamento a consumidor
0,6 ou 1,2	Medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento Alimentação de instrumentos de controle: amperímetro, wattímetro, varímetro, fasímetro, etc.
3	Serviços de medição, exceto medição de potência ou energia
5 ou 10	Serviços de proteção

Fonte: Adaptado de Medeiros Filho (1997).

Medeiros Filho (1997) relata que a quantidade de ampères-espiras não é constante em TCs com derivações no secundário nas respectivas relações nominais. Em consequência, não é garantida a mesma exatidão do TC em todas as relações nominais obtidas com as derivações. Normalmente, a classe de exatidão especificada para TCs com derivações no secundário é garantida pelo fabricante apenas no funcionamento com o maior número de espiras.

A indicação da exatidão na placa de identificação é feita de uma das seguintes maneiras:

- a) TCs para serviço de medição: indica-se a classe de exatidão, seguida dos símbolos da menor e maior carga nominal com as quais se verifica esta classe de exatidão. Cada enrolamento secundário deve ter indicadas todas as suas classes de exatidão, com as cargas nominais correspondentes;
- b) TCs para serviço de proteção: indica-se a classe de exatidão, a classe do TC quanto à impedância, seguida da tensão secundária que aparece nos terminais do TC a 20 vezes a corrente secundária nominal.

2.3.9 Número de núcleos para medição e proteção

É muito frequente na prática – sobretudo em circuitos de alta tensão e extra-alta tensão – a utilização de TCs de vários núcleos. Trata-se de TC com vários enrolamentos secundários isolados e alocados cada um em seu próprio núcleo, formando um conjunto com um único enrolamento primário, cujas espiras (ou espira) enlaçam todos os secundários. Um dos secundários é comumente destinado à medição e os outros (ou o outro) são destinados à proteção.

Em TCs de vários núcleos, cada um dos enrolamentos secundários deve estar dentro de sua respectiva classe de exatidão, com os enrolamentos secundários dos demais núcleos conectados à sua carga ou curto-circuitados se não utilizados. O primário é um elemento comum a todos os núcleos, mas cada núcleo, com seu secundário próprio, atua como um TC independente dos outros.

2.3.10 Fator térmico nominal

O fator térmico nominal (F_t) é o valor pelo qual deve ser multiplicada a corrente primária nominal para que seja obtida a corrente primária máxima que um TC pode conduzir em regime permanente, com frequência nominal, sem exceder os limites de elevação de temperatura especificados para a sua classe de isolamento. São normalizados os seguintes valores, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992): 1,0; 1,2; 1,3; 1,5 e 2,0.

No caso de TC com dois ou mais núcleos, sem derivações, com relações diferentes entre si, e mesma corrente secundária nominal, o fator térmico da menor relação é

um dos indicados no parágrafo anterior, e os fatores térmicos das outras relações são obtidos pela fórmula abaixo, podendo resultar em valor menor que 1,0:

$$Ft_i = Ft_1 \cdot \frac{RTC_1}{RTC_i} \quad (1)$$

Em que,

Ft_i : fator térmico das outras relações nominais;

Ft_1 : fator térmico da menor relação nominal;

RTC_1 : menor relação nominal;

RTC_i : outras relações nominais.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), em TCs providos de derivações, as relações RTC_1 e RTC_i não devem ser obtidas das derivações, mas sim dos enrolamentos totais. Além disso, o fator térmico das relações especificadas, obtidas por derivações, menores ou iguais a RTC_1 , deve ser no mínimo igual a Ft_1 .

Em TCs de apenas um núcleo, para serviço de proteção, em que a corrente primária nominal deve ser maior que a corrente nominal do circuito por problemas de saturação do núcleo de proteção, o fator térmico pode ser menor que 1. Caso o TC possua derivações, o fator térmico das relações obtidas nas derivações deve ser especificado separadamente.

2.3.11 Corrente suportável nominal de curta duração

Também chamada de corrente térmica nominal (I_t), é o valor eficaz da corrente primária de curto-circuito simétrico que o TC pode suportar por um tempo definido, em geral, igual a 1 s, estando o enrolamento secundário em curto-circuito, sem que sejam excedidos os limites de elevação de temperatura especificados por norma.

De acordo com Belchior (2014), como referência, pode-se dizer que a corrente térmica é, no mínimo, 75 vezes e 45 vezes a corrente primária nominal para os TCs imersos em óleo mineral isolante e para os isolados em epóxi, respectivamente.

2.3.12 Valor de crista nominal da corrente suportável

Também chamada de corrente dinâmica nominal (I_d), é o valor de impulso da corrente de curto-circuito assimétrica que circula no enrolamento primário do TC e que este pode suportar por um tempo estabelecido de meio ciclo, estando os enrolamentos secundários em curto-circuito, sem que seja afetado elétrica e mecanicamente, em virtude das forças eletromagnéticas desenvolvidas.

O valor de crista nominal da corrente suportável é, quando não especificado, 2,5 vezes o valor da corrente suportável nominal de curta duração.

2.3.13 Uso

De acordo com o local de instalação, os TCs podem ser projetados para uso interno (*indoor*), quando utilizados em espaços devidamente abrigados, ou externo (*outdoor*), quando utilizados em ambientes com exposição ao tempo.

2.4 Condições desfavoráveis de operação

A partir do que foi apresentado nos itens anteriores, é possível afirmar que, em condições satisfatórias de operação, os TCs para serviço de proteção devem reproduzir de maneira fidedigna os sinais de corrente durante faltas no sistema.

Em oposição a esta característica desejável, os núcleos dos TCs possuem características magnéticas não lineares, podendo, quando expostos a altas correntes de falta, alcançar elevados níveis de fluxo em seu núcleo. Neste caso, a densidade de fluxo poderá ficar acima da capacidade do núcleo, ocorrendo o que se denomina de saturação do TC. Como resultado, a forma de onda da corrente secundária, responsável pela informação que alimenta os relés de proteção, irá apresentar-se distorcida, levando a consequências indesejáveis na operação destes dispositivos.

Por essa razão, a completa compreensão do comportamento de TCs em regime transitório é de grande relevância para o estudo de proteções de sistemas elétricos. Sob esta perspectiva, o capítulo a seguir desenvolve os fundamentos por trás da saturação dos TCs, evidenciando suas principais causas e consequências. Para analisar este fenômeno, foi considerada a utilização do ATP para modelagem de TCs.

3 PROBLEMA DA SATURAÇÃO

Os TCs devem ser projetados e especificados para suportar as correntes de operação permanente em regime de longa duração e as correntes máximas que ocorrem nas condições transitórias resultantes dos curtos-circuitos em regime de curta duração. Entretanto, quando as faltas do sistema ocorrem com valores de correntes além dos previstos, o núcleo do TC poderá saturar prematuramente, produzindo significativa distorção na forma de onda da corrente secundária refletida.

O núcleo dos TCs destinados aos serviços de proteção, quando comparado com o dos TCs de medição, apresenta baixa permeabilidade magnética, permitindo a saturação somente para uma densidade de fluxo elevada. Segundo Coelho (2011), em núcleos de aço silício do tipo *hypersil M-5* esta densidade gira em torno de 18.000 a 20.000 gauss. Quantitativamente, esses valores correspondem a uma corrente primária de 20 vezes o seu valor nominal. Como relatado no capítulo anterior, este é o limite de operação para que não ocorram distorções acima do admitido pela classe de exatidão do equipamento.

O conhecimento da resposta do TC em regime de saturação é necessário tanto para avaliar a forma de onda característica da corrente secundária como para investigar os possíveis impactos desta condição nos dispositivos de proteção a ele associados.

3.1 Saturação do TC

Para entender o fenômeno de saturação, deve-se considerar a tensão secundária máxima a partir da qual o TC passa a sofrer os efeitos da saturação. A partir desse valor, ele não atende mais aos requisitos de sua classe de exatidão. O conhecimento desse valor de tensão se dá pela curva de excitação (ou saturação) típica de cada TC.

3.1.1 Curva de excitação

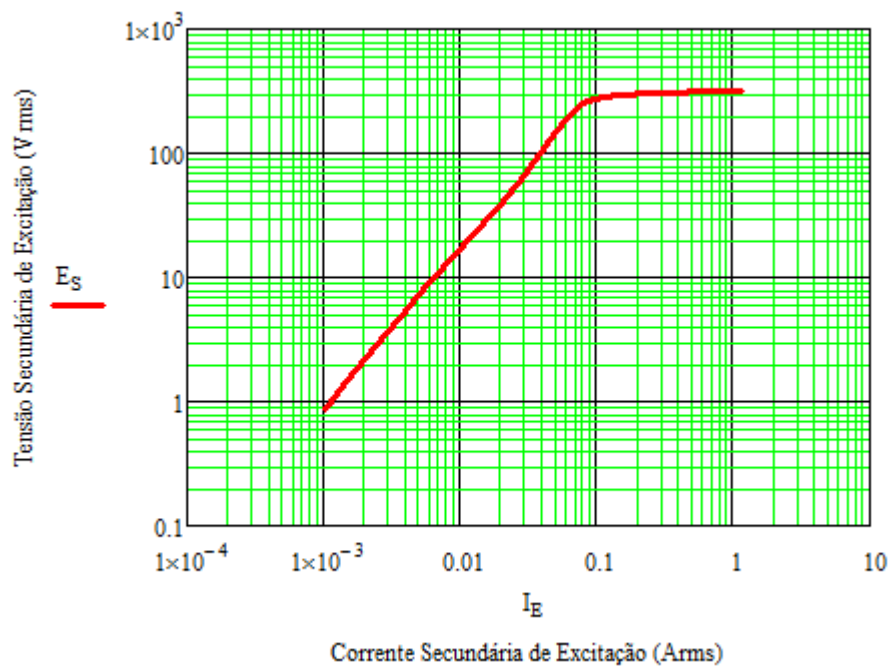
Os materiais magnéticos que compõe os núcleos dos TCs são todos sujeitos à histerese. Esse fenômeno é caracterizado pelo traçado da curva de densidade de fluxo magnético como uma função da força magnetizante, também chamada curva *B-H*.

A característica de excitação secundária do TC, dada pela curva de saturação, é uma representação alternativa da curva *B-H*. A curva de excitação é um gráfico do valor eficaz da tensão secundária de excitação (E_S) como uma função do valor eficaz da corrente de

excitação do núcleo (I_E). A curva $B-H$ e a curva de excitação possuem formas semelhantes porque a densidade de fluxo magnético B é proporcional à E_S e a intensidade de campo magnético H é proporcional à I_E .

A Figura 5 mostra uma curva de saturação típica de um TC com classe de exatidão de 10B200 e relação de transformação máxima de 1200-5 A, ajustado em 1200-5 A. No Apêndice A, estão disponíveis os dados utilizados para o levantamento da curva de excitação.

Figura 5 – Curva de excitação de um TC 10B200 ajustado em 1200-5 A



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para que a característica de excitação do TC seja compreendida, é necessário, primeiramente, definir e apontar as regiões e os pontos fundamentais que compõe a curva de saturação do equipamento.

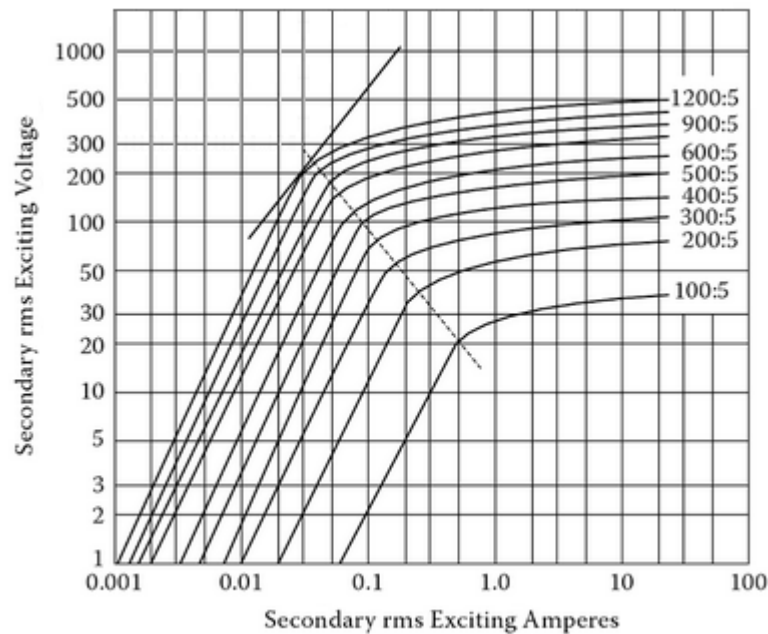
Quando a tensão secundária é baixa, a corrente de excitação I_E é baixa e o TC opera quase linearmente, situação em que não é verificada saturação do núcleo magnético. Como a tensão secundária aumenta devido ao aumento da corrente de carga ou ao incremento da impedância conectada aos terminais secundários, a corrente de excitação aumenta e o fluxo magnético no núcleo também aumenta nestas condições. A uma dada magnitude do fluxo, o núcleo satura e a corrente de excitação aumenta desproporcionalmente. Neste momento, a corrente secundária já não é uma réplica exata da corrente primária. As duas definições

apresentadas caracterizam, respectivamente, a região linear e a região de saturação da curva de excitação.

Uma segunda descrição importante diz respeito à tensão no ponto de joelho (V_K) da curva de saturação do TC. As normas ANSI/IEEE e IEC definem o ponto de joelho de formas distintas.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (1992) expressa que para um TC sem entreferro, o valor da tensão do ponto de joelho é definido pelo ponto sobre a curva de excitação onde a tangente possui um ângulo de 45° em relação à abscissa. A curva de excitação deve estar grafada em papel *log-log* com década quadrática, como apresentado na Figura 6. Quando o TC tem um núcleo com entreferro, o valor da tensão do ponto de joelho é o ponto onde a reta tangente à curva faz um ângulo de 30° com a abscissa.

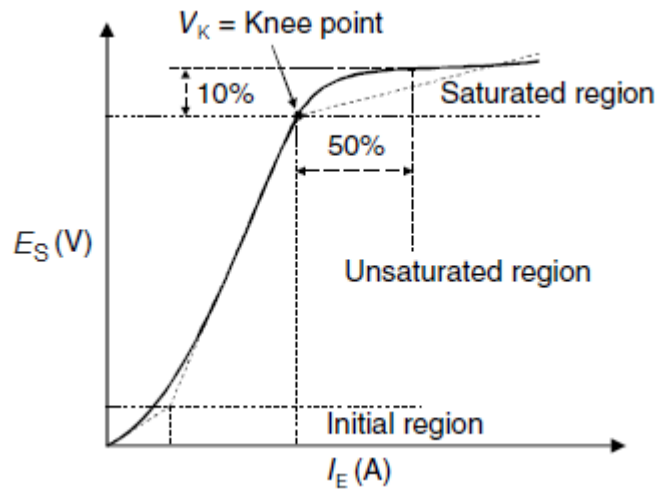
Figura 6 – Tensão no ponto de joelho segundo a norma ANSI/IEEE



Fonte: Adaptado de Shoaib Khan, Sheeba Khan e Ahmed (2007)

De acordo com a *International Electrotechnical Commission* (2003), o ponto de joelho da curva de excitação é definido como aquela força eletromotriz V_K eficaz mínima aplicada aos terminais secundários do TC, com todos os outros terminais estando em circuito aberto, na frequência nominal, que ao incrementada por 10%, causa um aumento na corrente de excitação eficaz não mais que 50%, como indicado na Figura 7.

Figura 7 – Tensão no ponto de joelho segundo a norma IEC



Fonte: (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2004)

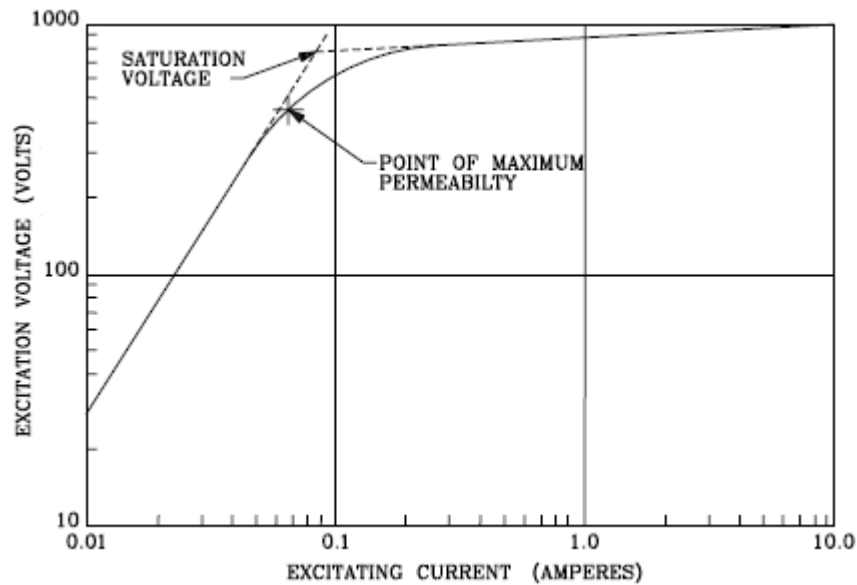
Um último parâmetro fundamental na análise de desempenho de TCs é a tensão de saturação. É por meio da curva de excitação que se obtém o valor da tensão de saturação V_{SAT} . A determinação de V_{SAT} também varia conforme a norma a qual se adota.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (1992) define a tensão de saturação como a tensão simétrica sobre o enrolamento secundário do TC para a qual o pico da indução apenas excede a densidade de fluxo de saturação. O valor da tensão de saturação é obtido graficamente, correspondendo ao ponto de interseção das porções de reta da curva de excitação sobre os eixos *log-log*, como mostra a Figura 8.

Segundo a IEEE Std. 100, este valor não é o mesmo da tensão no ponto de joelho sobre a curva onde a reta tangente faz um ângulo de 45° com a abscissa – considerado como ponto de máxima permeabilidade para TC com núcleo sem entreferro – porque se considera que no ponto de máxima permeabilidade ainda não se está na região de saturação do núcleo.

A *International Electrotechnical Commission* (2003) descreve o fluxo de saturação como aquele valor de pico do fluxo que existiria em um núcleo na transição da condição de não saturado para a condição de completamente saturado, considerando ser o ponto da característica *B-H* para o núcleo em questão no qual um aumento de 10% em *B* provoca um aumento corresponde de 50% em *H*. Como *B* é diretamente proporcional à E_S e *H* é diretamente proporcional à I_E , basicamente, adota-se, segundo a IEC 60044-1, o ponto de joelho como referência para o fluxo de saturação e, conseqüentemente, para a tensão de saturação.

Figura 8 – Tensão de saturação segundo a norma ANSI/IEEE



Fonte: (RELAY WORK GROUP, 2014)

3.1.2 Tipos de saturação

A saturação do núcleo do TC pode ser produzida por uma excessiva corrente de curto-circuito simétrica, assim como devido à presença de componente contínua em uma corrente de falta assimétrica de relativa baixa magnitude. Estas características podem ser utilizadas para classificar e definir os tipos de saturação.

3.1.2.1 Saturação CA

A saturação CA, também chamada de saturação de estado estável, é causada pela elevada magnitude da corrente de curto-circuito ou pela alta impedância de carga. Segundo Mardegan (2010), a saturação é dita CA quando a tensão de componente alternada da corrente de falta, gerada pelo produto da corrente simétrica referida ao secundário pela impedância total do circuito secundário, supera a tensão limite que o TC pode fornecer.

3.1.2.2 Saturação CC

A saturação CC, também chamada de saturação transiente, é causada pela componente contínua na corrente primária do TC. Esse tipo de saturação é frequentemente

encontrado, uma vez que a corrente de falta geralmente contém uma parcela apreciável de componente CC.

3.1.3 Fatores que influenciam na saturação

Como já indicado nos itens anteriores, as seguintes condições podem promover a saturação do TC:

- a) Elevada corrente primária;
- b) Elevado *burden* secundário;
- c) Assimetria da corrente de curto-circuito;
- d) Fluxo remanescente no núcleo do TC.

Analisando estes fatores, é possível concluir que a saturação do TC pode ser evitada aumentando-se a seção reta dos núcleos, ou por meio da redução da carga conectada ao seu secundário. O primeiro método, porém, é dispendioso, uma vez que implica em um aumento do volume de material ferromagnético do equipamento, e o segundo método pode ser de difícil aplicação prática. A carga de um TC é composta pelo somatório das impedâncias dos relés e de outras cargas ligadas em série, do enrolamento secundário e da fiação de interligação. Além disso, para uma dada aplicação, a carga do relé não pode ser reduzida pela utilização de correntes secundárias nominais mais baixas.

Segundo Coelho (2011a), o núcleo de um TC pode saturar prematuramente para correntes bem abaixo do nível normal devido à presença de fluxo remanescente. Os materiais utilizados no projeto de fabricação dos núcleos dos TCs podem ter remanência elevada, de modo que, mesmo após o desligamento de um curto-circuito, o núcleo poderá manter um fluxo remanescente elevado, suficiente para causar saturação na próxima excursão da corrente na direção de aumento do fluxo total.

3.2 Modelos de simulação computacional

3.2.1 O ATP

O ATP é um programa mundialmente utilizado para a simulação de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética, bem como eletromecânica, em sistemas de potência. Com esse programa digital, redes complexas e sistemas de controle de estrutura variada podem ser simulados. “Para além dos módulos de simulação, o ATP possui suporte a rotinas

que podem ser usadas para gerar modelos de dados, como computação de parâmetros de linha ou derivações de matrizes RL para representar múltiplas fases.” (PRIKLER; HØIDALEN, 2009, tradução nossa).

De acordo com Prikler e Høidalen (2009), o EMTP, a partir do qual o ATP teve sua origem, foi desenvolvido em domínio público na *Bonneville Power Administration* (BPA) de Portland, Oregon, antes da iniciativa comercial em 1984 pela *EMTP Development Coordination Group* e a *Electric Power Research Institute* (EPRI) de Palo Alto, California. O programa inicial trabalhava com a simulação de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação.

Com o passar dos anos, o programa foi experimentando alterações de diversos colaboradores do mundo todo. A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um processo de desenvolvimento estruturado com os usuários do EMTP, que o tornou uma ferramenta influente em estudos de transitórios em sistemas elétricos, segundo Tavares, Campos e Prado (2003).

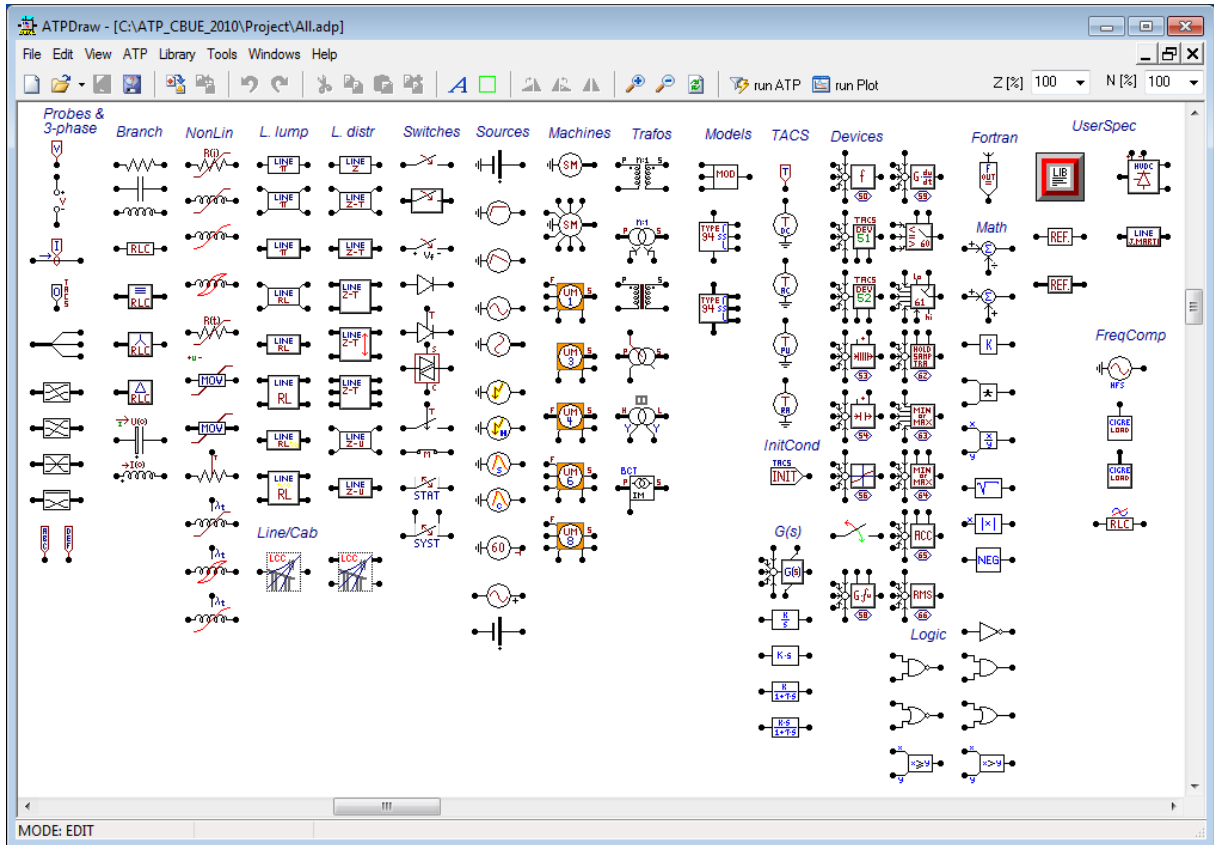
O nascimento do ATP data do início de 1984, quando Scott Meyer não aprovou a comercialização proposta na BPA. Meyer, então, começou um novo programa a partir de uma cópia do EMTP de domínio público da BPA.

Inicialmente, o programa ATP trabalhava com arquivos de dados em formato de texto, baseado na inserção de cartões de entrada e geração de cartões de saída, o que tornava o estudo de transitórios de difícil realização mesmo para os profissionais da área. O ATPDraw surgiu como uma versão de análise gráfica do ATP. No ATPDraw, o usuário pode construir o modelo digital do circuito a ser simulado usando o mouse e selecionando, interativamente, os componentes predefinidos de uma extensa paleta. Então, o ATPDraw gera o arquivo de entrada para a simulação no ATP no formato apropriado, baseado no “o que você vê é o que você obtém” (do inglês, *what you see is what you get*). A Figura 9 mostra os componentes disponíveis para utilização no programa.

O ATPDraw é mais valioso para novos usuários do ATP-EMTP e é uma excelente ferramenta para propósitos educacionais. “No entanto, é a possibilidade de modelagem multicamadas que faz do ATPDraw um processador *front-end* poderoso para profissionais em análise de transientes de sistemas de energia elétrica.” (PRIKLER; HØIDALEN, 2009, tradução nossa).

O ATPDraw é livre de direito e pode ser baixado gratuitamente. No entanto, é necessário adquirir uma licença antes de obter permissão para o *download* do programa e da documentação presente na internet, ou para receber os materiais relacionados ao ATP.

Figura 9 – Lista de componentes predefinidos do ATPDraw



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2 Construindo um modelo no ATP

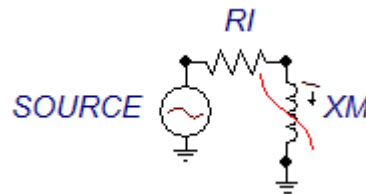
Um TC pode ser modelado no ATP de diferentes maneiras. Segundo Egorova (2011), uma delas é utilizando o transformador saturável (TRAFO_S). Outro método – o qual foi usado neste trabalho – utiliza dois componentes: um transformador ideal (TRAFO_I) e um indutor não linear. A indutância não linear tem duas representações principais no ATP: o *Type* 93 e o *Type* 98. Elementos não lineares podem ter vários potenciais problemas numéricos no processo de simulação transitória.

“Para a representação do indutor saturável, o indutor não linear *Type* 93 é uma opção mais atraente devido a sua característica $L-i$ ‘verdadeira’.” (EGOROVA, 2011, tradução nossa). Verdadeira, neste caso, quer dizer que, em cada passo de tempo, um processo iterativo

é aplicado a fim de obter uma solução muito próxima da real. Assim, o núcleo do TC foi representado com o indutor não linear *Type 93*.

Para inserir a característica $\lambda-i$ no elemento *Type 93* foram considerados os dados da curva típica de $V-I$. Primeiramente, foram realizados testes no ATP para validar os dados do modelo do núcleo do TC criado com os dados de referência. Para isso, foi formado um circuito simples, e diferentes tensões da curva $V-I$ foram aplicadas. A listagem do arquivo de entrada do ATP para o circuito de teste do indutor não linear *Type 93* está disponível no Apêndice B.

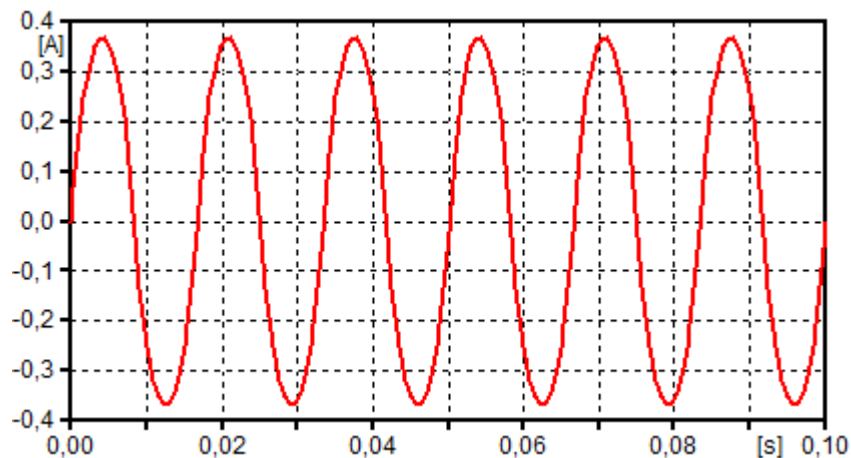
Figura 10 – Circuito de teste do indutor não linear *Type 93*



Fonte: Elaborada pelo autor.

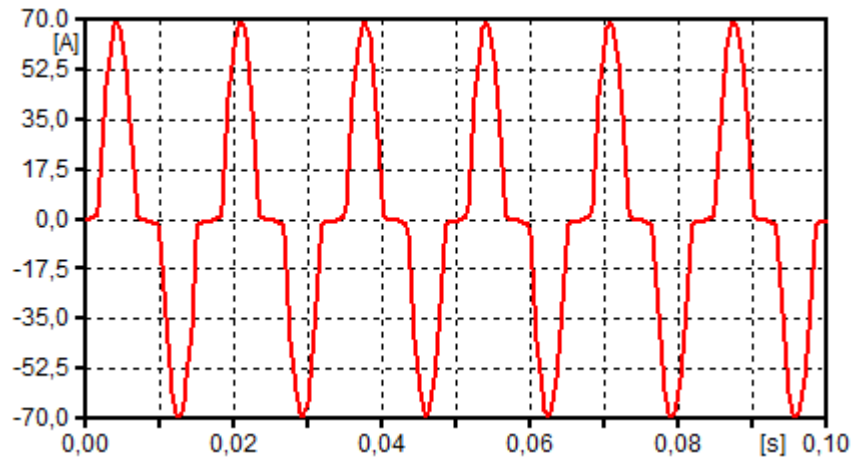
A resistência RI entre a fonte de tensão e o indutor não linear tem um valor arbitrariamente pequeno. Para tensões muito abaixo da tensão no ponto de joelho, as correntes têm uma onda senoidal pura e os valores são muito próximos dos dados fornecidos. Na região de alta saturação, as correntes do elemento não linear têm a forma de onda distorcida. Estas duas condições estão representadas pelas Figuras 11 e 12, respectivamente.

Figura 11 – Corrente no elemento *Type 93* em tensão abaixo do ponto de joelho



Fonte: Elaborada pelo autor.

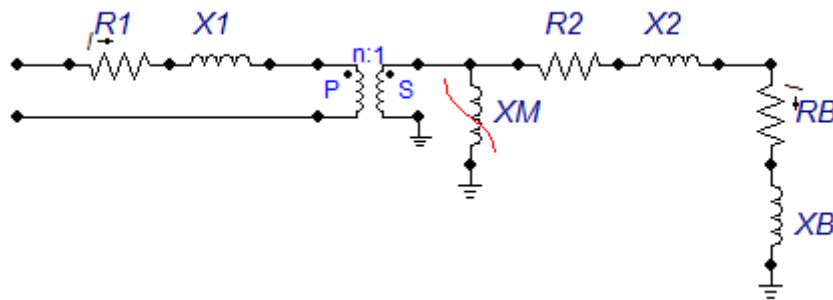
Figura 12 – Corrente no elemento *Type 93* em tensão acima do ponto de Joelho



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verificada a simulação do indutor não linear, foi criado um modelo de TC no ATP o mais próximo possível de um TC real, como mostra a Figura 13. Assim, o desempenho do TC poderá ser analisado a partir das correntes secundárias que percorrem as cargas conectadas entre seus terminais.

Figura 13 – Modelo do TC no ATP com o indutor não linear *Type 93*



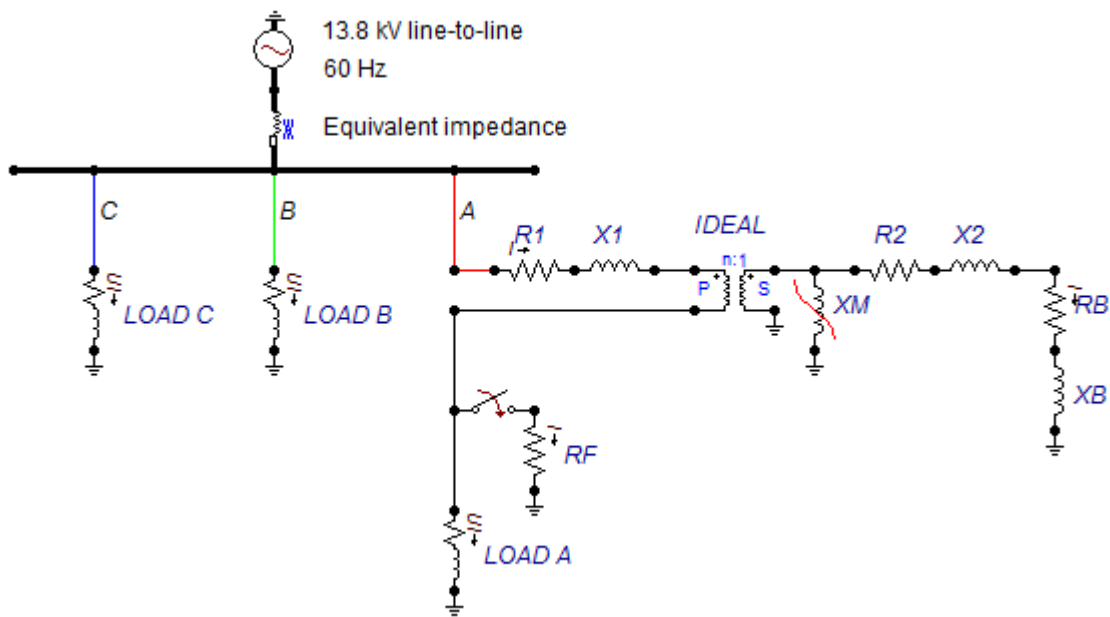
Fonte: Elaborada pelo autor.

A depender dos propósitos da simulação, como a queda de tensão provocada pela circulação da corrente de carga no enrolamento primário do TC é praticamente desprezível, a resistência R_1 e a reatância X_1 poderão ser desconsideradas do modelo completo sem grandes prejuízos. Além disso, poderão ser omitidas as reatâncias X_2 e X_B do circuito secundário quando se tratar de simulações envolvendo relés numéricos.

3.2.3 Resposta em regime de saturação

Para analisar a resposta do TC em regime de saturação, um pequeno sistema elétrico foi modelado no ATP, como apresentado na Figura 14. A listagem do arquivo de entrada do ATP para o sistema proposto está disponível no Apêndice C.

Figura 14 – Sistema simplificado utilizado para o estudo dos efeitos de saturação



Fonte: Elaborada pelo autor.

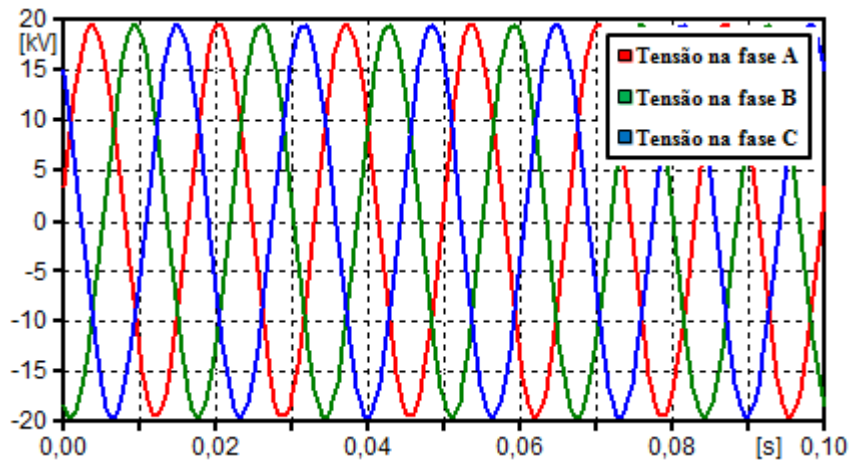
Neste sistema, a fonte gera tensão em 13,8 kV entre fases e o componente RL de parâmetros concentrados representa a impedância reduzida na barra. Além disso, *LOAD A*, *LOAD B* e *LOAD C* modelam, respectivamente, a carga das fases A, B e C. A resistência RF constitui a impedância de falta e foi inserida no sistema para simular uma ocorrência monofásica no ponto assinalado.

As formas de onda das tensões e das correntes de regime permanente das fases A, B e C para o sistema proposto são mostradas nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

A seguir, considerando que no instante $t = 0,0333$ s (dois ciclos da rede) um curto-circuito fase-terra atinja a fase A, as formas de onda das tensões e das correntes do sistema passam a ter a configuração apresentada nas Figuras 17 e 18.

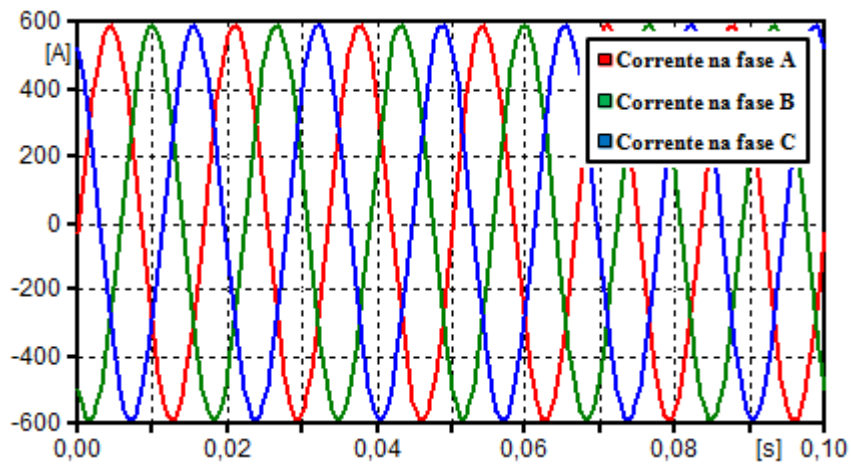
Nesta nova condição, serão avaliados os efeitos do *burden* secundário e da assimetria da corrente de falta na forma de onda da corrente secundária do TC.

Figura 15 – Tensões de regime permanente das fases A, B e C



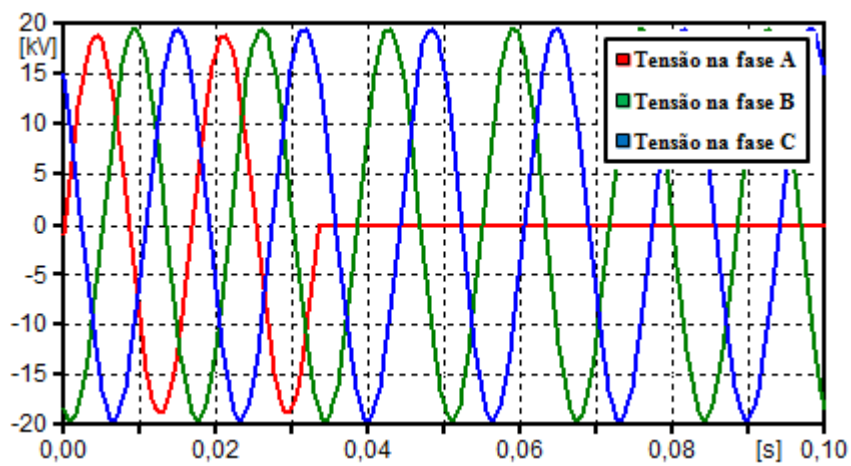
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Correntes de regime permanente das fases A, B e C



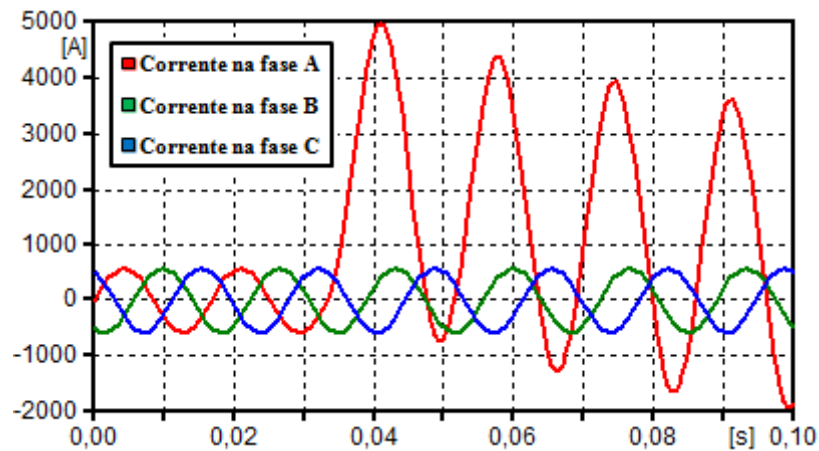
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Tensões na condição de curto-circuito fase-terra na fase A



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Correntes na condição de curto-circuito fase-terra na fase A



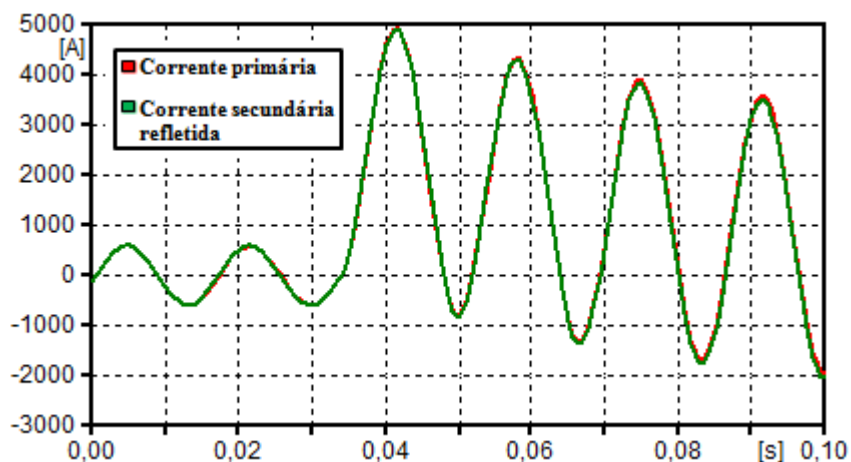
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3.1 Impacto do *burden* secundário

Todos os dispositivos e cabos que se conectam ao TC representam certa carga secundária. Uma vez que todos os dispositivos alimentados por um TC têm suas impedâncias de entrada conectadas em série, a soma de todas elas resultará na carga total do TC.

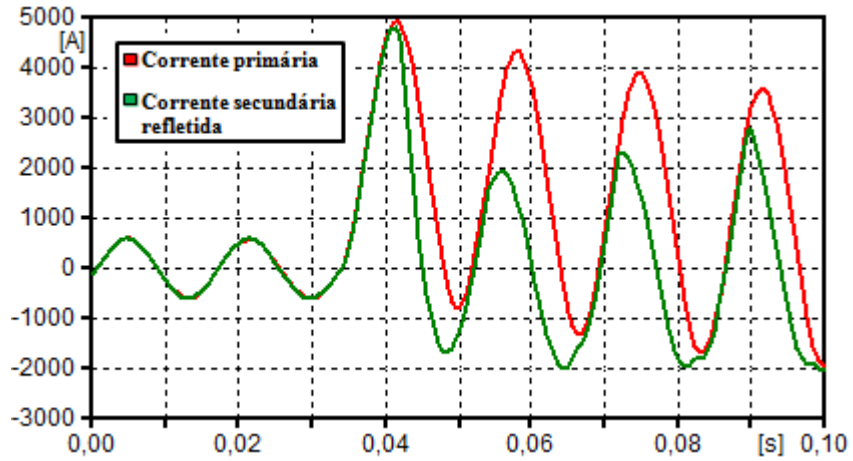
O impacto do *burden* secundário na forma de onda da corrente secundária do TC pode ser analisado a partir das Figuras 19, 20, 21 e 22, onde o valor de X_B do circuito equivalente da Figura 13 foi mantido constante e igual a $0,01 \Omega$ e o valor de R_B variou de $0,3$ a 10Ω .

Figura 19 – Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 0,3 \Omega$



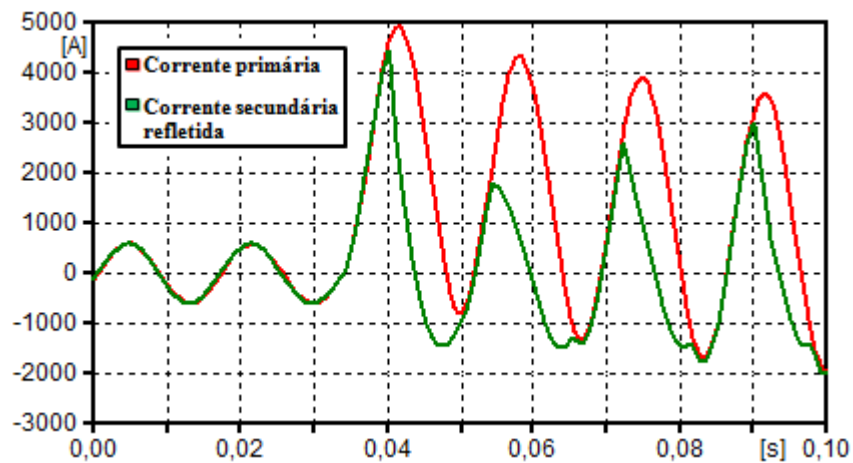
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 3 \Omega$



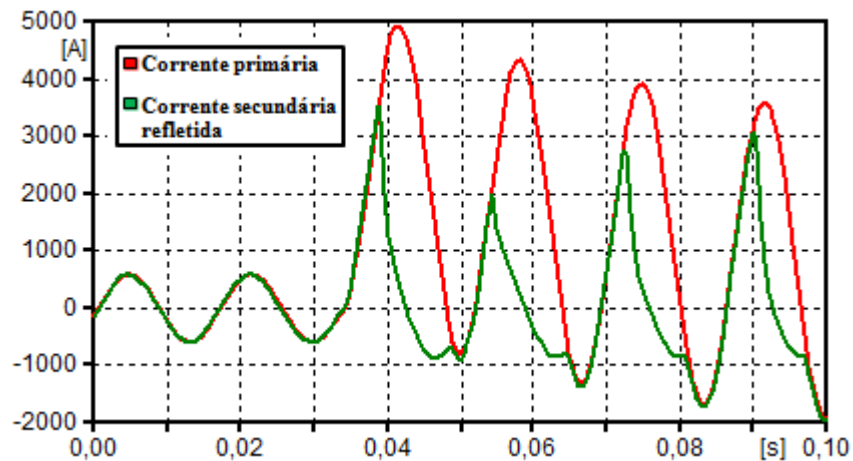
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 5 \Omega$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Corrente secundária vista do lado primário para $R_B = 10 \Omega$



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3.2 Impacto da assimetria da corrente de falta

A assimetria da corrente de curto-circuito se dá nos primeiros instantes da ocorrência da falta. Tal fenômeno pode ser observado analisando-se a equação genérica da corrente de curto-circuito:

$$i_f(t) = I_m \sin(\omega \cdot t + \varphi - \theta) - I_m \sin(\varphi - \theta) \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Em que,

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (4)$$

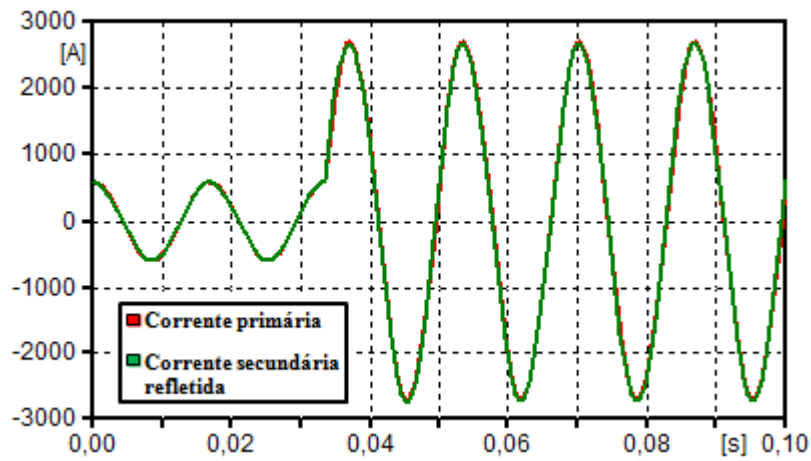
$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega \cdot R} = \frac{X}{2\pi f \cdot R} \quad (5)$$

A componente que varia senoidalmente com o tempo é denominada componente simétrica da corrente de curto-circuito e a componente que varia no tempo com uma função exponencial amortecida é a componente contínua.

O grau de assimetria da corrente de curto-circuito é função direta do instante em que a falta foi aplicada. Note que a magnitude da componente CC varia de um valor mínimo, quando $\varphi - \theta = 0$ ou π , a um valor máximo, quando $\varphi - \theta = \pm \pi/2$.

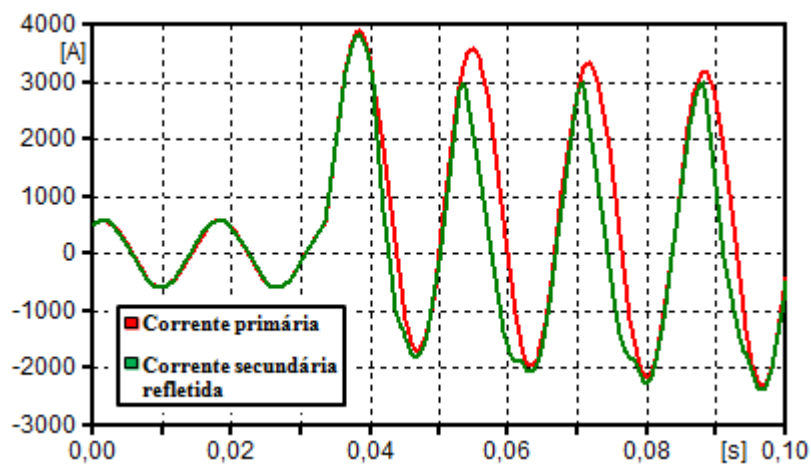
O impacto da assimetria da corrente de falta na forma de onda da corrente secundária do TC pode ser analisado a partir das Figuras 23, 24, 25 e 26, em que os valores de R_B e X_B do circuito equivalente da Figura 13 foram mantidos constantes e iguais a 3Ω e $0,01 \Omega$, respectivamente, e o valor de $\varphi - \theta$ variou de 0 a $-\pi/2$.

Figura 23 – Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx 0$



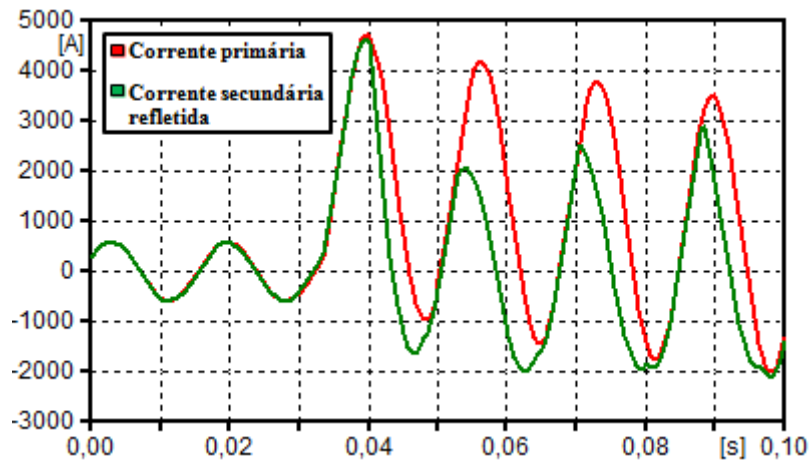
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx -\pi/6$



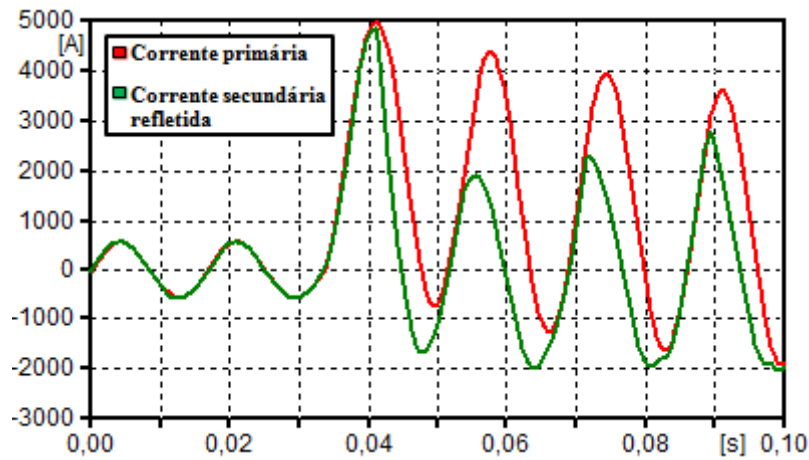
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx -\pi/3$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Corrente secundária vista do lado primário para $\varphi - \theta \approx -\pi/2$



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Efeitos da saturação do TC

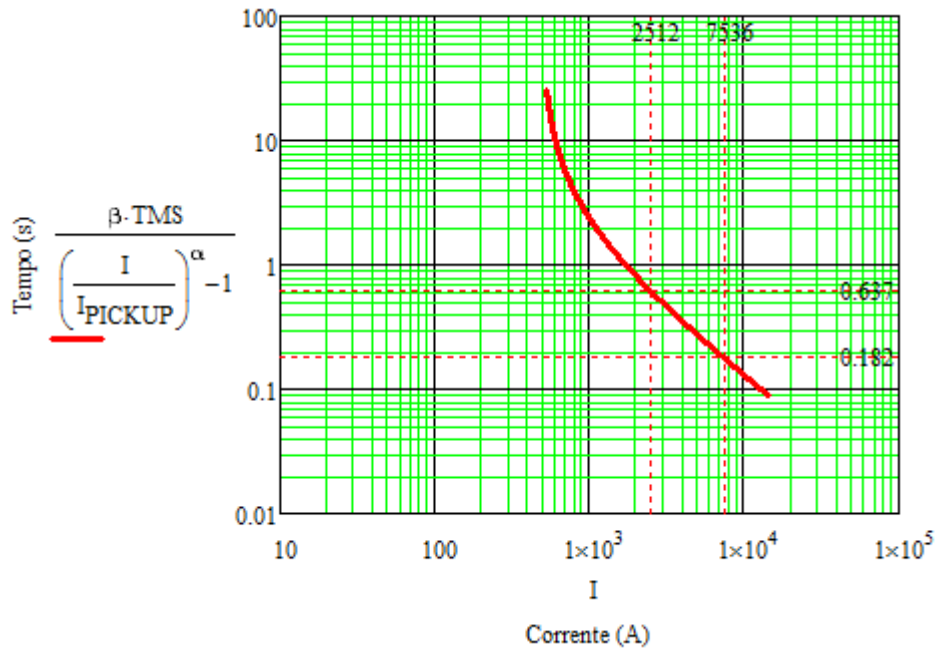
Alguns dos principais efeitos que podem ser constatados quando um TC opera em estado de saturação são:

- a) Forma de onda da corrente secundária distorcida;
- b) Desligamentos indevidos das proteções diferenciais;
- c) Operações incorretas das proteções de distância;
- d) Relés temporizados a tempo inverso mais lentos;
- e) Relés de sobrecorrente podem não operar.

Como apresentada nas figuras do item anterior, a magnitude e a forma de onda do sinal de corrente visto pelo relé são dependentes das condições de funcionamento do TC. Em estado de saturação, há uma forte tendência de redução do valor eficaz da corrente secundária em comparação àquela que deveria circular caso o TC operasse satisfatoriamente. Essa redução na magnitude da corrente secundária pode provocar operações indevidas, ou não operações, dos dispositivos de proteção associados ao TC defeituoso.

Especificamente, em se tratando de relés de sobrecorrente de tempo inverso, esta redução no valor eficaz da corrente secundária resulta em operações mais lentas, cuja intensidade depende do nível de saturação a que o TC está sujeito. A Figura 27 retrata este efeito na operação dos relés. Os parâmetros de ajuste considerados para o levantamento da curva constam na Tabela 5.

Figura 27 – Efeito da saturação em relés de sobrecorrente de tempo inverso



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Valores de ajuste para o relé de sobrecorrente

RTC	TAPE (A)	TMS	Temporização
160	3,0	0,19	MI

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando-se que a corrente de curto-circuito real no ponto de instalação seja de 7536 A, o relé deverá operar em 0,182 s. Porém, devido à saturação do TC, o valor eficaz da corrente de falta visto pelo relé é reduzido para 2512 A, retardando a operação deste dispositivo. Neste caso, a atuação ocorrerá em apenas 0,637 s.

3.4 Medidas para reduzir ou evitar os efeitos da saturação

De acordo com Mardegan (2010), as principais providências para a redução ou eliminação dos efeitos da saturação do TC são:

- Aumento da relação de transformação do TC;
- Redução do *burden* secundário;
- Aumento da tensão secundária nominal;
- Aplicação de dispositivos que limitem o valor da corrente de curto-circuito;
- Aumento da seção do núcleo;

- f) Utilização de TCs auxiliares;
- g) Utilização de relés que tenham um *firmware* que lineariza a curva de saturação;
- h) Utilização de TCs especialmente projetados para os efeitos transitórios;
- i) Utilização de relés digitais que possuem técnicas para identificar a saturação do TC e atuam para corrigir o valor da corrente distorcida.

A solução admitida deverá levar em conta aspectos técnicos, econômicos e operacionais. Dentre as medidas assinaladas, algumas resultam na troca do equipamento, outras medidas requerem a instalação de dispositivos auxiliares que melhorem as condições de operação do sistema.

Identificar os equipamentos em potencial estado de superação é necessário para reduzir os impactos provocados por estes no sistema. Técnicas que avaliam a adequação dos equipamentos devem ser utilizadas tanto no projeto de novas unidades, como em instalações antigas da rede elétrica.

Uma das metodologias que podem ser consideradas na análise de superação de TCs é aquela recomendada pelo ONS. O capítulo a seguir apresenta essas técnicas e avalia as condições de aplicabilidade de cada critério.

4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Se as características nominais dos TCs não forem devidamente selecionadas para as condições de falta e de operação em regime a que estão submetidos, seu núcleo poderá saturar e, em consequência disto, a operação dos relés de proteção será afetada – como foi discutido no capítulo anterior.

Existem documentos baseados em normas internacionais que norteiam os agentes do sistema na padronização dos critérios de avaliação de superação de TCs. Em particular, os requisitos estabelecidos neste trabalho são baseados na Nota Técnica ONS nº 0048/2014 rev. 2015. Este documento é uma compilação de diversos relatórios técnicos elaborados pelo Grupo de Trabalho para Análise da Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS) e emitidos pelo ONS.

4.1 Contextualização

Por imposição da regulação em vigor, o ONS detém a competência de conduzir, anualmente, o processo de levantamento de potenciais condições futuras de superação de equipamentos por intermédio do GT-AS. Este grupo, coordenado pelo Operador, foi criado em 2004 e é integrado por agentes da geração, distribuição e transmissão. Particularmente, este pode ser subdividido em duas classes de acordo com o rol de equipamentos envolvidos no estudo. Segundo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013), o Grupo 1 é responsável pela metodologia para avaliação de superação de disjuntores, seccionadoras e bobinas de bloqueio e o Grupo 2 pela análise dos TCs.

Todo ano, o ONS emite um volume específico do Plano de Ampliação e Reforços (PAR), Volume IA, que enquadra a relação de instalações e de equipamentos da Rede Básica (RB) que se encontram superados e que, portanto, deverão ser substituídos, ou que deverão apresentar alguma medida mitigadora que elimine a superação. O Volume IA do PAR é encaminhado oficialmente à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ao Ministério de Minas e Energia (MME), que atuam no sentido de providenciar a licença dos devidos reforços indispensáveis para evitar a inaceitável ocorrência de superação de equipamentos na operação do sistema, pois esta impõe riscos não somente de desempenho e estrutural, mas também de segurança pessoal.

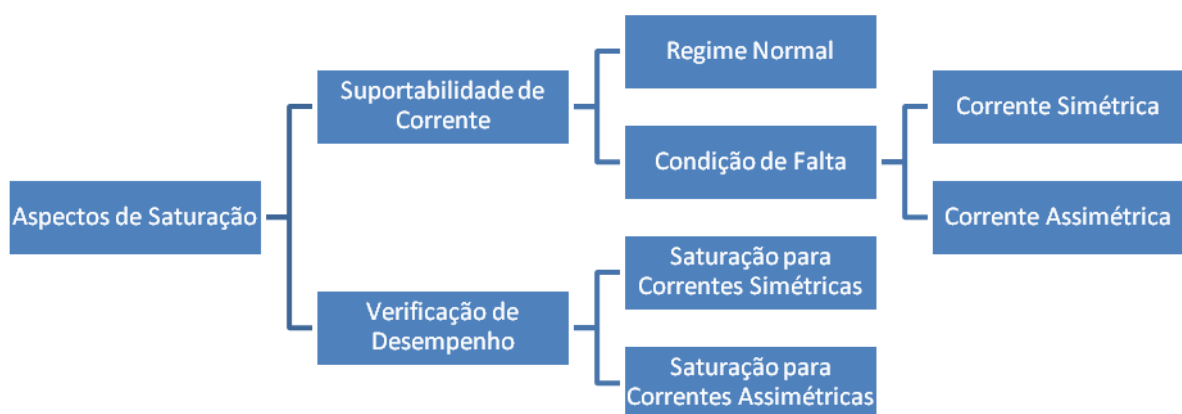
A Nota Técnica ONS nº 0048/14 tem como objetivo descrever a metodologia de verificação de superação de equipamentos da RB. Integra esta nota o procedimento de análise de TCs, o qual foi desenvolvido pelo Grupo 2, formado por agentes do setor elétrico e pelo ONS. Os critérios de avaliação propostos consideram o equipamento como sendo ideal durante toda sua vida útil e, por isso, o grau de envelhecimento deste e a degradação de suas características nominais não são considerados na metodologia explorada pelo grupo, sendo de atribuição dos agentes o detalhamento da análise e a indicação da real necessidade de substituição do equipamento.

4.2 Aspectos de saturação

De acordo com Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013b), a avaliação de superação de TCs pode ser dividida em dois aspectos. O primeiro aspecto está relacionado com a suportabilidade quanto às correntes de regime permanente e de falta. O segundo aspecto refere-se à análise de desempenho, em que é avaliada a resposta do TC frente aos relés de proteção em situações de curto-circuito.

O diagrama apresentado na Figura 28 resume os pontos fundamentais examinados durante análise da superação de TCs.

Figura 28 – Visão geral dos critérios de superação de TCs



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a avaliação da superação, o agente pode selecionar dentre dois métodos – a depender do tipo de abordagem pretendida. Os métodos são classificados na Nota Técnica ONS nº 0048/14 como Avaliação simplificada e Avaliação completa.

Na Avaliação simplificada, a análise de superação de TCs é fundamentada nas correntes de regime nominal e de curtos-circuitos, na qual são examinadas as suportabilidades térmica e mecânica do equipamento.

Na Avaliação completa, além dos critérios definidos pela Avaliação simplificada, são investigadas as capacidades de respostas dos TCs, levando-se em consideração os tempos de atuação da proteção e/ou eliminação da falta.

4.2.1 Suportabilidade de corrente simétrica e assimétrica

Nesta seção, os TCs são avaliados quanto à suportabilidade do enrolamento primário frente às correntes de regime permanente e de curtos-circuitos simétricos e assimétricos. De modo geral, são comparadas as correntes obtidas das análises de fluxo de carga e de curto-circuito com as especificações de corrente nominal, corrente térmica e corrente dinâmica do equipamento.

4.2.1.1 Regime normal

A corrente de regime nominal analisada deve corresponder à situação de máxima carga, fazendo-se a análise de fluxo de potência para a condição de perda de um elemento da rede (condição N-1). A escolha das contingências deve ser realizada objetivando o maior impacto em termos de circulação de correntes.

Alternativamente, podem-se investigar as solicitações para a condição de máxima transferência de potência do transformador de força conectado ao TC ou para a capacidade de condução do alimentador que atravessa o equipamento.

Em regime normal, a verificação de superação é feita comparando-se a corrente máxima de regime permanente I_{mL} com a corrente nominal do TC multiplicada pelo fator térmico Ft da relação empregada:

$$I_{mL} > I_{1N} \cdot Ft \quad (6)$$

4.2.1.2 Condição de falta

A superação por curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de faltas simétricas e assimétricas com magnitude superiores àquelas definidas como nominais

para os equipamentos analisados, levando-se em consideração condições normais de operação e de contingência. Normalmente, a solicitação causada pela corrente de curto-circuito simétrica é de origem térmica e está relacionada com a dissipação de energia nas resistências dos equipamentos e a solicitação causada pelos esforços eletrodinâmicos da corrente de curto-circuito, de origem mecânica, é determinado pelo valor de crista da corrente de curto-circuito.

4.2.1.2.1 Corrente simétrica

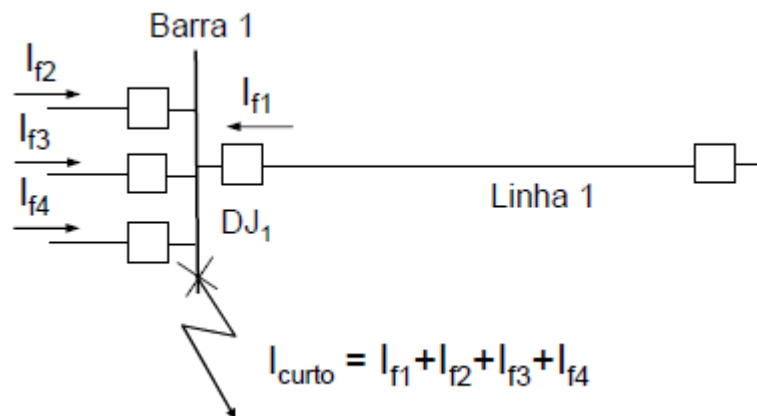
Neste caso, a superação é caracterizada pela incidência de correntes de defeito simétricas superiores à corrente nominal de curto-circuito suportada pelo equipamento.

Segundo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013b), a corrente de curto-circuito analisada deve corresponder à condição mais severa de contribuição de falta pelo TC, devendo ser avaliados tanto os níveis das correntes de curtos-circuitos monofásicos como os níveis das correntes de curtos-circuitos trifásicos. A base de dados utilizada para as análises de faltas deve ser aquela disponibilizada pelo ONS no horizonte do PAR.

Nos estudos finais, a pior condição de contribuição de faltas pode ocorrer em três situações distintas: faltas nas barras, faltas terminais e faltas sob a condição de *line-out*. Estas três condições estão descritas pelas Figuras 29, 30 e 31, respectivamente.

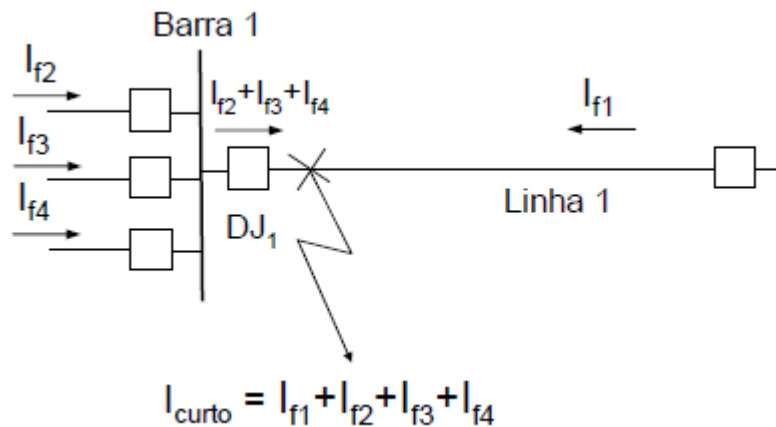
D’Ajuz (1985 *apud* FERREIRA, 2006) exprime que, na maioria dos casos, a condição de *line-out* é a mais severa, pois a corrente de contribuição pelo TC é a própria corrente de falta.

Figura 29 – Contribuição das correntes de curto-circuito para falta na barra



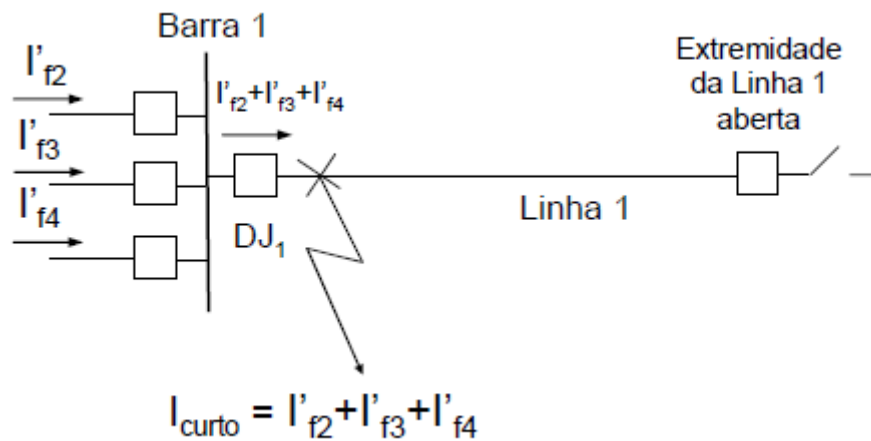
Fonte: (FERREIRA, 2006)

Figura 30 – Contribuição das correntes de curto-circuito para falta terminal



Fonte: (FERREIRA, 2006)

Figura 31 – Contribuição das correntes de curto-circuito para condição de *line-out*



Fonte: (FERREIRA, 2006)

Caso seja utilizado o programa ANAFAS, as simulações de faltas terminais podem ser obtidas aplicando-se o curto-circuito na barra e, em seguida, subtraindo a contribuição do elemento ao qual o TC está conectado.

Neste tipo de avaliação, compara-se a corrente de curto-circuito simétrica obtida com o valor de corrente suportável nominal de curta duração do TC (I_t), ocorrendo superação nos casos em que,

$$I_{CS} > I_t \quad (7)$$

4.2.1.2.2 Corrente assimétrica

A superação por corrente assimétrica se dá pela crista da corrente de curto-circuito em magnitudes superiores às aquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise.

“A corrente de curto-circuito de pico é obtida por meio de três equacionamentos distintos: a ‘equação de meio ciclo’, tradicionalmente utilizada; a equação da norma ‘IEC 60909’ e a equação da norma ‘IEEE Std. 551’.” (GRIGOLETTO, 2013).

De posse dos valores da corrente de curto-circuito simétrica (I_{CS}) e da relação X/R obtidos das simulações, é possível presumir o valor da corrente de curto-circuito para um defeito plenamente assimétrico (I_{CA}) aplicando-se a equação:

$$I_{CA} = \sqrt{2} \cdot I_{CS} \cdot \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (8)$$

Em que τ é a constante de tempo primária, dada por:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{X}{R} \quad (9)$$

O valor máximo da corrente de falta assimétrica (I_{mCA}) é então obtido para meio ciclo após a ocorrência do curto-circuito. Para a frequência de 60 Hz, este valor é de 0,0083 s. Substituindo este tempo em (8), obtém-se:

$$I_{mCA} = \sqrt{2} \cdot I_{CS} \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,0083}{\tau}}\right) \quad (10)$$

A suportabilidade do TC frente a correntes de curtos-circuitos assimétricas é verificada comparando-se o resultado obtido de (10) com o valor de crista nominal da corrente suportável (I_d).

$$I_{mCA} > I_d \quad (11)$$

4.2.2 Verificação de desempenho

Além dos pontos tratados no método de avaliação da suportabilidade da corrente, a verificação de desempenho investiga a resposta de corrente secundária do TC, considerando o *burden* secundário e suas propriedades magnéticas. Com o intuito de facilitar a análise, a

avaliação de resposta do TC é dividida em duas etapas, quais sejam: verificação de saturação para faltas simétricas, na qual não é considerada a presença da componente CC da corrente de curto-circuito, e para faltas assimétricas, em que é considerada a presença da componente CC transitória.

4.2.2.1 Saturação para correntes simétricas

De acordo com Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013b), nesta fase de avaliação, pretende-se detectar os TCs em condições críticas quanto ao risco de saturação. Uma vez verificada a saturação para faltas simétricas, o TC é indicado como superado, sendo dispensada a avaliação deste para faltas assimétricas, cujas técnicas empregadas são mais exaustivas, além de haver necessidade de um maior volume de dados específicos.

A saturação é examinada comparando-se o valor eficaz da tensão imposta ao TC durante a condição de curto-circuito com a tensão de saturação do equipamento (V_{SAT}). A tensão imposta ao secundário de um TC quando da ocorrência de uma falta simétrica (V_{CS}) é obtida pela expressão:

$$V_{CS} = \frac{I_{CS}}{RTC} \cdot (Z_{2N} + R_2) \quad (12)$$

Em que,

I_{CS} : valor eficaz da corrente primária de curto-circuito simétrico;

RTC : relação de transformação do TC;

Z_{2N} : *burden* nominal do TC;

R_2 : resistência do enrolamento secundário.

Alternativamente, pode ser tomado, no lugar do *burden* nominal do TC (Z_{2N}), o somatório das impedâncias nominais dos relés e dos cabos na Equação (12).

Portanto, é verificada a saturação do TC caso a tensão imposta calculada seja superior à tensão de saturação do equipamento, conforme a Equação (13).

$$V_{CS} > V_{SAT} \quad (13)$$

O critério para determinação da tensão de saturação é definido de acordo com os procedimentos ANSI/IEEE e IEC apresentados no capítulo anterior. Caso seja empregado o método ANSI/IEEE, a tensão de saturação é determinada através da intersecção das retas de subida e de saturação da curva de excitação. No caso de os dados disponíveis não fornecerem medidas suficientes para a determinação da reta da região de saturação, pode-se utilizar, alternativamente, o procedimento ANSI/IEEE para obtenção da tensão no ponto de joelho da curva de excitação.

4.2.2.2 Saturação para correntes assimétricas

“O critério de 20 vezes a corrente nominal, como sendo o limite para que o TC não exceda a sua classe de exatidão, somente é válido para correntes de falta puramente simétricas. Em outras palavras, evita-se a saturação CA utilizando-se tal critério.” (COELHO, 2011a).

Segundo Coelho (2011a), na presença de componente CC, o TC poderá saturar para valores de falta mesmo abaixo de 20 vezes da corrente nominal, dependendo da relação X/R no curto-circuito, bem como de outras condições como o *burden* secundário e o fluxo remanescente.

Nesta etapa, o equacionamento proposto para a avaliação de saturação é baseado na norma IEC 60044-6:1992, que trata da especificação técnica de TCs destinados à proteção quando submetidos às faltas assimétricas. Analogamente ao exposto no item anterior, este critério baseia-se na comparação da tensão de saturação do TC (V_{SAT}) com o valor eficaz da tensão imposta ao secundário, com a particularidade desta última ser formulada considerando-se o tempo de atuação das proteções e o ciclo de operação do disjuntor. É empregada, ainda, uma equação simplificada nos casos sem religamento com o intuito de facilitar o processo de avaliação.

Para o cálculo da tensão imposta ao secundário quando da ocorrência de um curto-circuito assimétrico (E_{AL}), a Nota Técnica ONS nº 0048/14 propõe a aplicação da Equação (14), sendo esta uma releitura daquela apresentada na IEC.

$$E_{AL} = V_{CS} \cdot K_{td} \quad (14)$$

Esta formulação é justificada devido ao enfoque da metodologia apresentada no documento abordar a avaliação de TCs existentes e não especificação de TCs.

Na Equação (14), V_{CS} é dada pela Equação (12). O parâmetro K_{td} é definido como fator de dimensionamento transitório, no qual são integrados dados como constantes de tempo primária e secundária, e ciclo de operação do disjuntor. Para cada ciclo específico, deve-se calcular o K_{td} correspondente a partir do equacionamento fornecido pela IEC.

4.2.2.2.1 Formulação para os casos sem religamento (ciclo C-O)

Para ciclos C-O, a verificação de saturação pode ser avaliada segundo duas abordagens. A primeira trata de maneira simplificada o cálculo da tensão imposta ao secundário do TC quando da ocorrência de um curto-circuito assimétrico e a segunda considera a formulação recomendada pela IEC.

Alguns requisitos devem ser respeitados durante a análise de saturação para os casos sem religamento. A seguir, a aplicabilidade das formulações é avaliada segundo tais requisitos.

a) Formulação simplificada

Com o intuito de minimizar o número de TCs analisados pelo equacionamento da IEC, inicialmente é utilizada a Equação (15) para o cálculo simplificado da tensão imposta assimétrica para os casos sem religamento.

$$E_{AL} = V_{CS} \cdot \left(1 + \frac{X}{R}\right) \quad (15)$$

A Equação (15) determina a máxima tensão que poderá ser imposta ao secundário do TC para uma determinada localização de instalação do equipamento e independentemente do tempo de atuação da proteção. Segundo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013b), não é possível, entretanto, aplicá-la para os casos com religamento automático (ciclo C-O-C-O), uma vez que sua dedução é baseada somente na incidência da primeira falta (fluxo magnético partindo de zero) e, portanto, não considera o fluxo residual no núcleo do TC.

b) Formulação IEC 60044-6:1992

O equacionamento presente na IEC 60044-6, por definição, baseia-se em cargas puramente resistivas conectadas aos terminais secundários dos TCs. Para permitir que a

análise com cargas indutivas (relés eletromecânicos) também seja possível, é necessário adaptar as formulações. Para os casos sem religamento, o cálculo da tensão imposta requer o valor de K_{td} obtido a partir da Equação (16), fornecida pela IEC e ajustada aos tipos de carga mencionados.

$$K_{td} = \frac{\omega \cdot \tau \cdot \xi}{\tau - \xi} \left(e^{-\frac{t_{CO}}{\tau}} - e^{-\frac{t_{CO}}{\xi}} \right) + \frac{1}{\cos \theta} \quad (16)$$

τ é a constante de tempo primária, ξ é a constante de tempo secundária e t_{CO} é o tempo de atuação da proteção no primeiro ciclo. O fator de potência da carga ($\cos \theta$) é dado por:

$$\cos \theta = \frac{R_2 + R_B}{\sqrt{X_B^2 + (R_2 + R_B)^2}} \quad (17)$$

Em que X_B e R_B são, respectivamente, a reatância e a resistência da carga do TC, podendo ser representadas por seus valores nominais ou, alternativamente, pelo somatório das impedâncias nominais dos relés e impedância dos cabos.

Por sua vez, a constante de tempo secundária é calculada, de forma genérica, conforme a expressão em (18).

$$\xi = \frac{L_M + L_B}{R_B + R_2} \quad (18)$$

A indutância da carga (L_B), porém, pode ser desprezada frente à indutância de magnetização do TC (L_M). Portanto, reescrevendo-se a Equação (18):

$$\xi = \frac{L_M}{R_B + R_2} \quad (19)$$

Inicialmente, ξ é calculada com base na carga nominal do TC. Caso seja necessário o levantamento do somatório das resistências para determinação de R_B , deve-se considerar o tipo de falta, como mostram as Figuras 32 e 33. Para faltas trifásicas tem-se:

$$R_B = R_{CABO} + \sum R_{RELÉS-FASE} \quad (20)$$

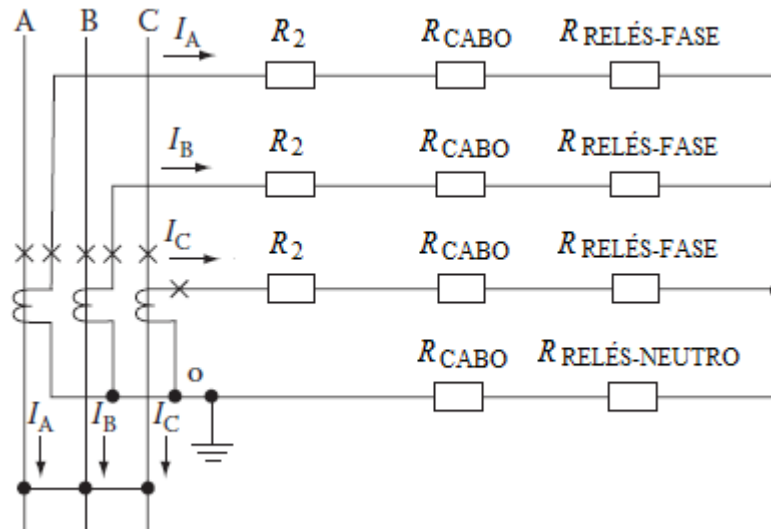
No caso de faltas monofásicas:

$$R_B = 2 \cdot R_{CABO} + \sum R_{RELÉS-FASE} + \sum R_{RELÉS-NEUTRO} \quad (21)$$

A indutância de magnetização L_M é calculada da seguinte forma:

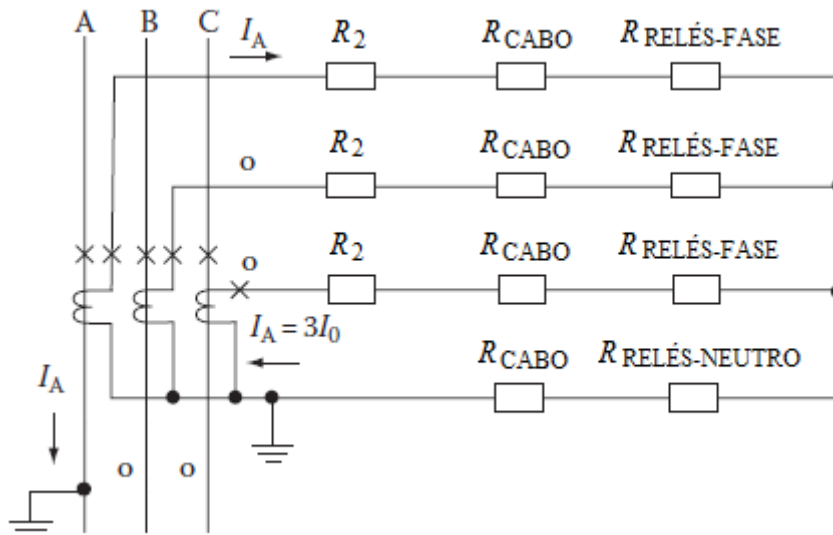
$$L_M = \frac{E_S}{I_E \cdot \omega} \quad (22)$$

Figura 32 – Levantamento das cargas secundárias para falta trifásica



Fonte: Adaptado de Blackburn e Domin (2014).

Figura 33 – Levantamento das cargas secundárias para falta monofásica



Fonte: Adaptado de Blackburn e Domin (2014).

Os pontos de tensão e de corrente, E_S e I_E , são retirados da região linear da curva de excitação do TC, ou seja, correspondem à tensão e corrente de magnetização. Através do

procedimento ANSI/IEEE para a determinação da tensão de saturação, utiliza-se diretamente o mesmo ponto da tensão para o cálculo de L_M . Caso a tensão de saturação seja empregada de acordo com o procedimento ANSI/IEEE para a determinação do ponto de joelho da curva de excitação, é necessário extrair outro ponto que pertença à região linear da curva.

É importante destacar, segundo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013b), que antes do cálculo definitivo de K_{td} , deve-se comparar o tempo de atuação da proteção no primeiro ciclo com o tempo que corresponde ao K_{td} máximo (t_{mKtd}), que por sua vez é extraído relação:

$$t_{mKtd} = \left(\frac{\tau \cdot \xi}{\tau - \xi} \right) \ln \left(\frac{\tau}{\xi} \right) \quad (23)$$

Caso t_{CO} seja maior que t_{mKtd} , deve-se fazer $t_{CO} = t_{mKtd}$ na Equação (16).

Assim, a verificação de saturação para faltas assimétricas é feita comparando-se a tensão imposta com a tensão de saturação do TC.

$$E_{AL} > V_{SAT} \quad (24)$$

4.2.2.2.2 Formulação para os casos com religamento (ciclo C-O-C-O)

Para o ciclo de operação C-O-C-O, é necessário utilizar a Equação (25), fornecida na IEC e ajustada à aplicação de cargas resistivas e indutivas.

$$K_{td} = \left[\frac{\omega \cdot \tau \cdot \xi}{\tau - \xi} \left(e^{-\frac{t_{CO}}{\tau}} - e^{-\frac{t_{CO}}{\xi}} \right) + \frac{1}{\cos \theta} \right] e^{-\left(\frac{t_{FR} + t_{COCO}}{\xi} \right)} + \frac{\omega \cdot \tau \cdot \xi}{\tau - \xi} \left(e^{-\frac{t_{COCO}}{\tau}} - e^{-\frac{t_{COCO}}{\xi}} \right) + \frac{1}{\cos \theta} \quad (25)$$

t_{CO} é o tempo de eliminação da falta no primeiro ciclo, t_{FR} é o tempo morto e t_{COCO} é o tempo de atuação da proteção no segundo ciclo.

Destaca-se, novamente, que em caso de t_{COCO} ser maior que t_{mKtd} , deve-se fazer $t_{COCO} = t_{mKtd}$ na Equação (25). O tempo que corresponde ao K_{td} máximo (t_{mKtd}) deve ser calculado, também, pela expressão em (23), já que seu valor independe do ciclo de operação do disjuntor.

Assim como para os casos sem religamento, para o ciclo C-O-C-O a verificação de saturação para faltas assimétricas é feita comparando-se a tensão imposta com a tensão de saturação do TC.

$$E_{AL} > V_{SAT} \quad (26)$$

É importante destacar que as equações para o levantamento do K_{td} , apresentadas pela IEC 60044-6, são deduzidas das condições de faltas equilibradas. Considera-se, então, que as malhas secundárias dos TCs, de cada fase, sejam independentes. Assim, de acordo com Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013b), a verificação de desempenho, tratada na Avaliação completa, pode ser aplicada somente aos seguintes casos:

- a) Curtos-circuitos trifásicos na barra, terminal e *line-out*;
- b) Curtos-circuitos monofásicos *line-out*.

No primeiro caso, devido ao equilíbrio das correntes nas fases, as malhas dos secundários dos TCs podem ser representadas separadamente, uma vez que não há retorno de corrente pelo circuito de neutro.

Nas condições estabelecidas na segunda alínea, não há circulação de corrente nos secundários dos TCs das fases íntegras. Consequentemente, forma-se uma única malha no secundário da fase sob a condição de falta, na qual a corrente do circuito de fase é igual a corrente no circuito de neutro.

4.3 Considerações aos critérios de avaliação

Os procedimentos de análise de superação de TCs apresentados neste capítulo mostraram que os esforços matemáticos podem se tornar exaustivos quando aplicados a sistemas elétricos reais. Dada a necessidade de avaliar e identificar todos os TCs em potencial condição de superação, as técnicas desenvolvidas conduzem, inevitavelmente, a processos repetitivos, abrindo brechas para eventuais erros de medidas.

Baseado nessas percepções é que foi considerado o desenvolvimento de uma aplicação em Java, denominada PROSUPER, no intuito de reduzir as intervenções humanas nos procedimentos de cálculo, ao mesmo tempo em que os resultados da simulação podem ser avaliados interativamente.

Neste sentido, o capítulo a seguir dedica-se a apresentar as principais ferramentas de análise presentes no *software*, além de revelar a metodologia utilizada na geração dos resultados e na possibilidade de formação de um banco de dados com as características elétricas dos equipamentos do sistema.

5 PROSUPER

Com base nas formulações apresentadas no capítulo anterior, é possível constatar a importância do desenvolvimento de um *software* que atenda às exigências de simplificar os cálculos de avaliação, ao passo que mantenha a premissa de confiabilidade dos resultados obtidos. Neste sentido, o PROSUPER apresenta-se como um programa interativo para estudos de identificação e análise da superação de TCs, fundamentado nos critérios estabelecidos pelo ONS.

5.1 Idealização do programa

O PROSUPER foi originado em 2015 durante estágio curricular na Coelce, em Fortaleza, Brasil. O seu desdobramento foi possível graças às enormes contribuições do engenheiro Marcus Superbus (à época, chefe de equipe na área de Estudos e Análises da Operação). O programa surgiu para atender a necessidade local de avaliar a adequação dos TCs instalados – que se apresentavam nas suas diversas subestações – em tempo hábil.

5.2 Arranjo operacional

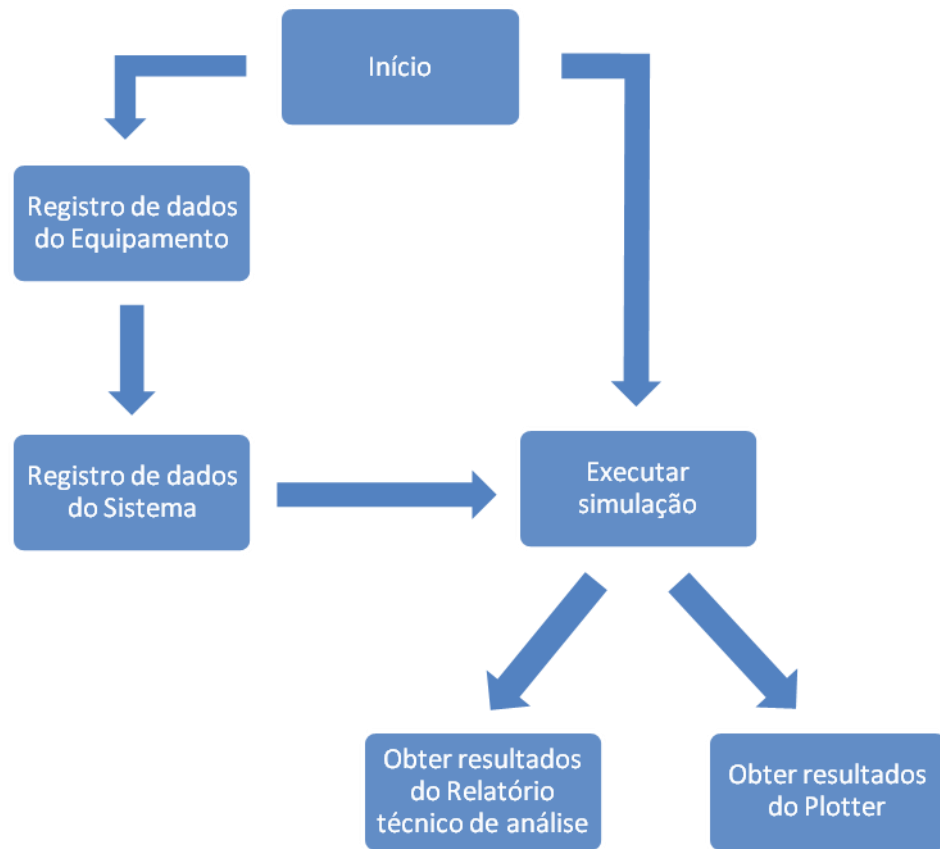
O arranjo operacional do PROSUPER pode ser caracterizado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 34.

O diagrama da Figura 34 descreve o processo geral efetuado pelo usuário durante o estudo de avaliação da superação de TCs. É possível identificar, a partir do fluxograma, os vários microssistemas existentes dentro do PROSUPER.

Primeiramente, tem-se a inicialização do programa, onde os processos essenciais para o pleno funcionamento do *software* são examinados e executados. A Figura 35 mostra a tela de carregamento do PROSUPER.

Posteriormente, o usuário define a execução da tarefa subsequente escolhendo uma dentre as seguintes opções: registro de dados e simulação dos métodos de avaliação dos TCs registrados, além de poder executar a ferramenta de cálculo dos parâmetros nominais presente no *software*.

Figura 34 – Fluxograma operacional do PROSUPER



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 – Tela de inicialização do PROSUPER



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 Registro de dados

Neste microssistema, é possível adicionar, editar e remover os dados técnicos dos TCs necessários para a execução dos testes de avaliação da superação. Como a origem do PROSUPER decorreu das necessidades da Coelce, é possível armazenar as informações em subestações distintas, sendo estas ordenadas nos chamados regionais. Um regional, neste sentido, nada mais é do que um conjunto de subestações dispostas segundo uma característica comum, seja por localidade, seja por funcionalidade.

Existem duas categorias principais de dados. Uma primeira categoria diz respeito às características do equipamento, que podem ser buscadas junto à placa de dados do TC e às informações contidas nos manuais dos fabricantes. A segunda categoria refere-se aos dados do sistema onde o TC está instalado.

5.3.1 Dados do equipamento

A Figura 36 exibe a tela principal para cadastro de dados dos TCs.

Figura 36 – Tela de cadastro de dados dos TCs

Fonte: Elaborada pelo autor.

Parte dos dados requisitados está disponível na placa de identificação dos TCs.

Dentre as exceções estão:

- a) Regional;
- b) Subestação;
- c) Código do equipamento;
- d) Elemento associado;
- e) Corrente primária nominal;
- f) Corrente secundária nominal;
- g) Resistência secundária;
- h) Resistência nominal da carga;
- i) Reatância nominal da carga;

O regional, a subestação, o código do equipamento e o elemento associado são informações que caracterizam a singularidade de um dado TC e que, no que lhes dizem respeito, facilitam a localização deste em um determinado diagrama unifilar.

A corrente primária nominal e a corrente secundária nominal são retiradas da relação de transformação utilizada pelo TC, isto é, da *RTC* ajustada.

A resistência secundária diz respeito à resistência do enrolamento do TC, a qual pode ser aproximada a partir de uma formulação aceitável ou buscada junto ao manual do fabricante (especificamente, do relatório de ensaios).

Por fim, a resistência nominal da carga e a reatância nominal da carga são dados referentes ao *burden* do TC. Estas informações são admitidas como àquelas nominais do equipamento ou, alternativamente, obtidas do somatório das impedâncias nominais dos relés e dos cabos de interligação.

5.3.2 Dados do sistema

A Figura 37 mostra a tela para cadastro de dados referentes ao sistema.

A potência nominal e a tensão nominal do componente em contingência estão relacionadas às informações para a situação de máxima carga. Devem ser obtidas de acordo com a metodologia aplicada: máxima transferência de potência do transformador de força ou capacidade de condução do alimentador que atravessa o equipamento.

Os dados referentes à corrente de curto-circuito e à relação *X/R* são obtidas visando a pior condição de faltas pelo TC, podendo ser acessadas a partir das simulações no ANAFAS.

Figura 37 – Tela de cadastro de dados do sistema

Sistema Elétrico - PROSUPER

Código do Equipamento:

Potência Nominal do Componente em Contingência: [MVA]

Tensão Nominal do Componente em Contingência: [kV]

Corrente de Curto-Circuito Simétrico: [kA]

Relação X/R:

Frequência da Rede: [Hz]

Número de Religamentos:

Tempo de Atuação da Proteção no Primeiro Ciclo: [s]

OK Cancelar

Fonte: Elaborada pelo autor.

O número de religamentos define o ciclo de operação do disjuntor, seja C-O seja C-O-C-O. Dependendo da especificação, serão requisitados os tempos de atuação da proteção no primeiro ciclo ou no primeiro e segundo ciclos acompanhados do tempo morto.

5.4 Módulos de simulação

A partir do PROSUPER, é possível efetuar a simulação das condições de operação dos TCs previamente armazenados no banco de dados sob as perspectivas da Avaliação simplificada e da Avaliação completa definidas na Nota Técnica ONS nº 0048/2014. Como visto no capítulo anterior, a depender do tipo de análise escolhida, é necessária uma quantidade maior ou menor de dados específicos do equipamento.

Caso seja adotada a Avaliação simplificada como método de análise de superação, os resultados da simulação geram a resposta a partir do exame dos TCs frente às condições de regime permanente e às de curto-circuito simétrico e assimétrico.

Uma vez selecionada a Avaliação completa, os mesmos critérios estabelecidos na Avaliação simplificada são simulados. Acrescentada a essa condição, tem-se a verificação de desempenho dos TCs.

Pode-se, ainda, escolher a dimensão da análise, seja ela efetuada individualmente, a partir do TC previamente selecionado, seja ela executada por subestação, onde todos os equipamentos que compõe a instalação são avaliados simultaneamente.

5.4.1 Avaliação simplificada

Após a seleção da Avaliação simplificada e do respectivo TC designado, uma janela é aberta sinalizando o resumo dos principais dados necessários para a análise assumida. A Figura 38 mostra esta janela e seus principais elementos.

Figura 38 – Resumo dos dados para a Avaliação simplificada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste ponto, o usuário pode definir a configuração dos resultados, seja ela obtida através da ferramenta gráfica ou por meio da emissão do relatório técnico de análise.

A Figura 39 exhibe a tela de apresentação dos resultados da Avaliação simplificada logo após a execução da aplicação.

Figura 39 – Tela de resultados da Avaliação simplificada

The screenshot shows a window titled "Resultados - PROSUPER". It contains three rows of text, each followed by an empty input field:

- 1º CRITÉRIO - SUPERAÇÃO PARA REGIME NOMINAL:
- 2º CRITÉRIO - SUPERAÇÃO PARA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO:
- 3º CRITÉRIO - SUPERAÇÃO PARA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ASSIMÉTRICO:

At the bottom right, there are two buttons: "Detalhes" and "Relatório".

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível identificar, a partir de então, a presença dos resultados referentes aos três critérios que compõe a Avaliação simplificada.

5.4.2 Avaliação completa

Após a seleção da Avaliação completa, e da posterior designação do TC a ser avaliado, uma janela é aberta sinalizando o resumo dos principais dados relacionados com a metodologia adotada. A Figura 40 exibe esta janela e seus principais elementos.

Figura 40 - Resumo dos dados para a Avaliação completa

The screenshot shows a window titled "Avaliação Completa - PROSUPER". It has three tabs: "Equipamento", "Sistema Elétrico", and "Proteção". The "Sistema Elétrico" tab is selected. The window displays the following parameters, each with an empty input field and a unit:

- Fator Térmico:
- Corrente Primária Nominal: [A]
- Corrente Secundária Nominal: [A]
- Corrente Suportável Nominal de Curta Duração: [kA] ef/1s
- Valor de Crista Nominal da Corrente Suportável: [kA] cr
- Tensão de Saturação: [V]
- Resistência Secundária: [Ω]
- Resistência Nominal da Carga: [Ω]
- Reatância Nominal da Carga: [Ω]

At the bottom, there are three buttons: "Run", "Plot", and "Cancelar".

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível verificar a necessidade de uma maior quantidade de dados para o emprego da Avaliação completa. Novamente, neste ponto, cabe ao usuário definir a configuração dos resultados, seja por meio da ferramenta gráfica, seja pela emissão do relatório técnico de análise.

A Figura 41 mostra a tela de apresentação dos resultados da Avaliação completa logo após a execução da aplicação.

Figura 41 – Tela de resultados da Avaliação completa

Resultados - PROSUPER

1º CRITÉRIO - SUPERAÇÃO PARA REGIME NOMINAL:

2º CRITÉRIO - SUPERAÇÃO PARA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO:

3º CRITÉRIO - SUPERAÇÃO PARA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ASSIMÉTRICO:

4º CRITÉRIO - SATURAÇÃO PARA FALTAS SIMÉTRICAS:

5º CRITÉRIO - SATURAÇÃO PARA FALTAS ASSIMÉTRICAS:

Detalhes Relatório

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível identificar, a partir de então, a presença dos resultados referentes aos cinco critérios que compõem a Avaliação completa. Além daqueles já presentes na Avaliação simplificada, existem outros dois critérios que compõe a chamada verificação de desempenho.

5.5 Métodos de obtenção dos resultados

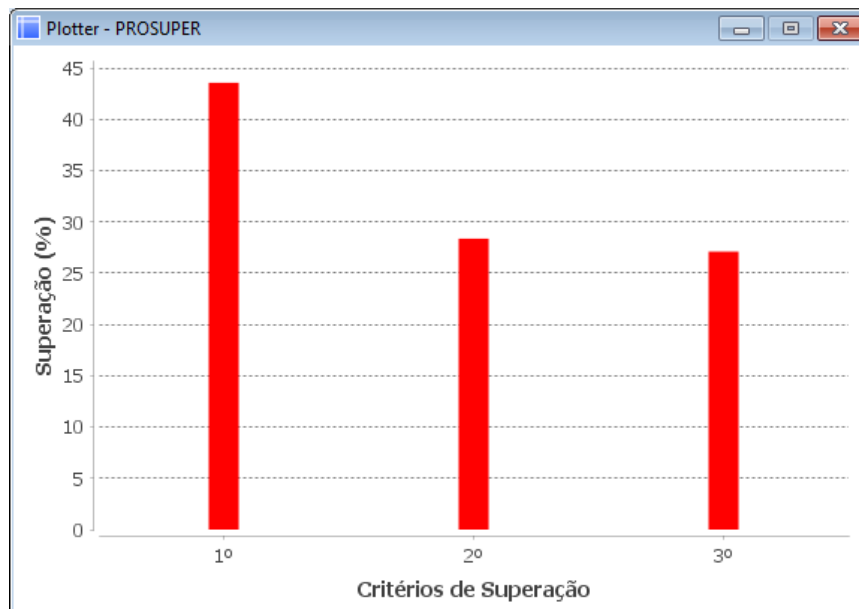
Como mencionado nos itens anteriores, o usuário pode escolher uma entre duas configurações possíveis para a apresentação dos resultados. Estas duas configurações ou tipologias são: a ferramenta gráfica e o relatório técnico de análise. Ambos os métodos são descritos a seguir.

5.5.1 O Plotter

O Plotter é uma ferramenta gráfica capaz de avaliar a superação do TC por meio da comparação entre a condição obtida a partir da simulação e a capacidade máxima nominal do equipamento. A ferramenta gera um esquema de barras a partir da razão percentual dos parâmetros avaliados nos diversos critérios de avaliação da superação.

A Figura 42 mostra um exemplo de análise realizada através do Plotter onde foi utilizada a metodologia da Avaliação simplificada.

Figura 42 – Esquema de barras gerado pelo Plotter



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5.2 Relatório técnico de análise

O relatório técnico de análise tem a vantagem de ser um documento formal capaz de anunciar os resultados da simulação tanto pela apresentação dos parâmetros nominais como pela presença do esquema de barras gerado pelo Plotter.

No Apêndice H, é apresentado um relatório técnico emitido pelo PROSUPER, no qual são expressos os resultados obtidos da simulação para o estudo de caso desenvolvido no Capítulo 6.

5.6 Ferramenta de cálculo dos parâmetros nominais

O PROSUPER conta, ainda, com uma ferramenta para cálculo de parâmetros nominais com base na classe de exatidão do TC. Como apresentado no Capítulo 2, a depender da norma utilizada como referência, a designação de um TC irá variar. Esta ferramenta, portanto, extrai, da respectiva designação, o erro de corrente, a tensão secundária nominal, o fator de sobrecorrente, a potência aparente e a carga padrão, utilizando como dados de entrada a norma admitida e a classe de exatidão do equipamento.

A Figura 43 exibe a tela de cálculo para um dado exemplo, onde foi considerada a NBR como norma de referência.

Figura 43 – Tela da ferramenta de cálculo dos parâmetros nominais

Norma:	<input type="text" value="NBR"/>	(Ex: NBR, IEC, ANSI)
Classe de Exatidão:	<input type="text" value="10B400"/>	(Ex: 10B 100, 5P20-25VA, B-1.0)
Erro de Corrente:	<input type="text" value="10.0"/>	[%]
Tensão Secundária Nominal:	<input type="text" value="400"/>	[V]
Fator de Sobrecorrente:	<input type="text" value="20"/>	(x In)
Potência Aparente Nominal:	<input type="text" value="100.0"/>	[VA]
Carga Padrão:	<input type="text" value="4.0"/>	[Ω]

Calcular Limpar

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados podem ser avaliados segundo a teoria apresentada nos capítulos precedentes.

5.7 Validando a aplicação desenvolvida

Para que o *software* possa ser aceito como uma ferramenta confiável na avaliação da superação de TCs, é necessário que se façam testes em que sejam englobadas as várias condições as quais tais equipamentos possam estar submetidos. Examinar os métodos de

análise segundo a Avaliação simplificada e a Avaliação completa, além de utilizar as ferramentas gráficas e de cálculo disponíveis no programa, são as primeiras atitudes a serem tomadas como forma de garantir a solidez e a segurança dos resultados.

Sob esta perspectiva, o capítulo a seguir trata de investigar, a partir de uma dada situação prática, os métodos de análise da superação de TCs, utilizando, em tal circunstância, os critérios estabelecidos no Capítulo 4. Os resultados foram obtidos segundo a ótica das formulações apresentadas na teoria e, em seguida, sob o emprego da ferramenta desenvolvida, como forma de validar a aplicação do PROSUPER nos estudos de adequação de TCs.

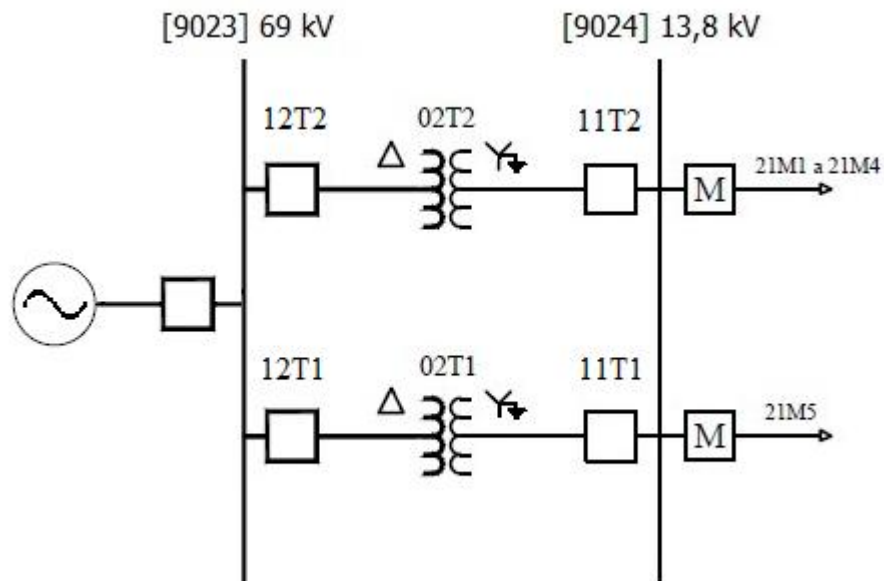
6 ESTUDO DE CASO

Aplicado no âmbito do sistema elétrico da Coelce, o estudo de caso desenvolvido neste capítulo tem como objetivo ilustrar o emprego dos critérios de avaliação da superação de TCs a uma conjuntura real, além de ratificar o *software* proposto no capítulo anterior.

6.1 Identificação do problema

As bases para o problema apresentado a seguir foram colhidas no decorrer do ano de 2015. Estas informações se referem aos equipamentos e à instalação em si da subestação de distribuição (SED) de Mucuripe (MCP), localizada no município de Fortaleza, Brasil. Esta subestação faz parte do regional de Delmiro Gouveia (DMG). Em especial, a análise da superação é dedicada ao TC 01Z1 associado ao disjuntor 11T1 desta subestação. O diagrama unifilar operacional simplificado da SED MCP está representado na Figura 44.

Figura 44 – Diagrama unifilar operacional simplificado da SED MCP



Fonte: Cortesia da Companhia Energética do Ceará.

Neste diagrama, os códigos 9023 e 9024 representam, respectivamente, as barras de 69 e 13,8 kV da subestação.

6.2 Levantamento de dados para o estudo

Primeiramente, faz-se necessário levantar os dados para o estudo de avaliação da superação de TCs. Como apresentado no Capítulo 4, e reiterado no anterior, existem, basicamente, dois tipos ou categorias principais de dados: os dados do equipamento (neste caso, do TC) e os dados do sistema ao qual o equipamento está conectado. Sem estas informações seria impossível aplicar as técnicas de adequação de TCs.

6.2.1 Dados do equipamento

Nesta seção, são colhidas todas as informações referentes ao TC avaliado. Tais informações são obtidas, principalmente, da placa de identificação e da Ordem de Ajuste da Proteção (OAP) referente ao equipamento, além do manual do fabricante e das premissas de projeto da subestação, de onde são tomadas todas as informações necessárias da carga vinculada ao TC.

6.2.1.1 Da placa de identificação do TC

Como mencionado anteriormente, o TC analisado é o 01Z1, associado ao 11T1, da SED MCP que pertence ao regional de DMG. A placa de identificação deste TC é apresentada no Anexo A. Para efeito de avaliação da superação, são necessários os seguintes dados, os quais foram colhidos junto à placa:

- a) Frequência;
- b) Fator térmico;
- c) Relações disponíveis;
- d) Classe de exatidão;
- e) Corrente térmica;
- f) Corrente dinâmica.

Outros dados são tomados da placa de identificação quando do registro das características do equipamento no PROSUPER. Esses, no entanto, têm função principal de identificar e criar um perfil próprio e completo para cada TC.

Assim, foram obtidas as seguintes informações:

$$f = 60 \text{ Hz} \quad (27)$$

$$Ft = 1,2 \quad (28)$$

$$I_t = 16 \text{ kA/1s} \quad (29)$$

$$I_d = 40 \text{ kAcr} \quad (30)$$

Além disso, 200/400/600x400/800/1200-5-5 A são as relações disponíveis do TC e 10B200 é a designação da classe de exatidão do equipamento.

6.2.1.2 Da Ordem de Ajuste da Proteção

Da OAP, outras informações para a análise da superação de TCs são levantadas. No que diz respeito aos dados do equipamento, deve ser tomada a relação de transformação do TC. Assim, da OAP foram colhidos os seguintes dados:

$$I_{1N} = 1200 \text{ A} \quad (31)$$

$$I_{2N} = 5 \text{ A} \quad (32)$$

6.2.1.3 Do manual do fabricante

Do manual do fabricante do TC, são tomados os dados referentes ao enrolamento secundário. Em especial, do relatório de ensaios presente nesse manual, o valor da resistência do enrolamento secundário pode ser obtido. Segundo Mardegan (2012), na ausência desta informação, pode ser calculado o valor aproximado dessa resistência a partir da Equação (33) apresentada a seguir:

$$R_2 = 0,00234 \cdot RTC + 0,0262 \quad (33)$$

e, do Capítulo 2,

$$RTC = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} \quad (34)$$

Assim, para o caso estudado,

$$RTC = \frac{1200}{5} = 240 \quad (35)$$

E, portanto,

$$R_2 = 0,00234 \cdot 240 + 0,0262 = 0,5878 \, \Omega \quad (36)$$

Lembre-se que, para efeitos de cálculo, foram desprezados os valores da reatância X_2 do enrolamento secundário.

6.2.1.4 Das premissas de projeto da subestação

Neste tópico, são incorporados os dados referentes ao *burden* secundário do TC, dos quais se devem destacar a carga imposta pelo relé e a impedância do cabo que interliga o relé ao equipamento.

6.2.1.4.1 Relé associado ao 01Z1

O relé associado ao TC 01Z1 da SED MCP é o TEAM-ARTECHE PL-250. Do manual do relé, é obtida a carga imposta, em VA, pelos circuitos de corrente, a qual pode ser transformada no respectivo valor em ohms pela seguinte expressão:

$$Z_{RELAY} = \frac{VA_{RELAY}}{I_{2N}^2} \quad (37)$$

Logo,

$$Z_{RELAY} = \frac{0,25}{5^2} = 0,01 \, \Omega \quad (38)$$

Devido às características construtivas do instrumento, pode-se considerar esta impedância como um valor puro ou aproximadamente resistivo, uma vez que a indutância associada é insignificante frente ao valor da resistência imposta pelo equipamento. Assim, para fins de cálculo:

$$R_{RELÉ-FASE} = R_{RELÉ-NEUTRO} = 0,01 \Omega \quad (39)$$

6.2.1.4.2 Cabo de interligação

A Tabela 6 apresenta os valores de impedâncias dos condutores mais comumente utilizados nos circuitos secundários de um TC a uma temperatura de 70 °C.

Tabela 6 – Impedância de cabos utilizados no secundário de TCs

Seção do cabo	R [Ω /km]	X [Ω /km]	Z [Ω /km]
2,5	8,87	0,16	8,87
4	5,52	0,16	5,52
6	3,69	0,15	3,69
10	2,19	0,14	2,19

Fonte: (MARDEGAN, 2012)

A seção do condutor utilizado no trecho que interliga o 01Z1 ao relé é de 4 mm² e a distância aproximada, medida em campo, do ponto de instalação do TC à casa de comandos, onde está localizado o relé, é de 40 m.

A partir da Tabela 6, é possível verificar que a impedância do cabo de interligação pode ser representada por uma resistência pura equivalente. Assim, tem-se:

$$R_{CABO} = d \cdot R_{\Omega km} \quad (40)$$

E, portanto,

$$R_{CABO} = 0,04 \cdot 5,52 = 0,2208 \Omega \quad (41)$$

6.2.2 Dados do sistema

Neste item, são colhidas todas as informações referentes ao ponto de instalação do TC. Tais informações são obtidas, principalmente, da placa de identificação do transformador de força, dos casos rodados de curto-circuito e, novamente, da OAP referente ao equipamento.

6.2.2.1 Da placa de identificação do transformador de força

Na determinação da corrente de carga do TC estudado, deve ser considerada a potência do transformador de força ao qual está associado em linha. Neste caso, devem ser tomados os dados do transformador 02T1 da SED MCP. A placa de identificação deste equipamento traz a seguinte especificação de potência: 10/12,5/15 MVA. Estes valores estão associados, respectivamente, com os estágios de refrigeração ONAN, ONAF1 e ONAF2. Para efeitos de estudos da superação é apropriado tomar o valor para a máxima potência. Assim, é colhida a seguinte informação:

$$S_{ONAF2} = 15 \text{ MVA} \quad (42)$$

Além da potência máxima, deve ser tomado, como referência, o valor da tensão de base para os cálculos da corrente de carga. Neste caso, como o TC está localizado no lado de baixa tensão do transformador de força:

$$V_{BS} = 13,8 \text{ kV} \quad (43)$$

6.2.2.2 Dos casos rodados no ANAFAS

Os níveis de curto-circuito do sistema no ponto de instalação do TC podem ser mensurados a partir das simulações de faltas utilizando o programa ANAFAS. Para o estudo de caso apresentado neste capítulo, foram colhidas as informações referentes às barras 9023 e 9024 da SED MCP. Os resultados dos casos rodados no ANAFAS para faltas na barra, terminal e *line-out*, monofásico e trifásico, são apresentados do Apêndice D ao Apêndice G. A Tabela 7 resume os valores obtidos, em que é levada em consideração apenas a corrente de falta pelo TC.

Tabela 7 – Resultados dos casos rodados no ANAFAS

Situação	Monofásico		Trifásico	
	mod. (A)	ang. (°)	mod. (A)	ang. (°)
Falta na barra	4708	-86,7	4252	-86,4
Falta terminal	4756	-86,7	4295	-86,4
Falta sob a condição de <i>line-out</i>	6231	-118,2	5020	-117,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Visando a pior condição de contribuição de falta, foi tomado, para o estudo, o valor máximo obtido para a corrente de curto-circuito. Deste modo,

$$I_{CS} = 6231 A \quad (44)$$

$$\frac{X}{R} = \tan -118,2^\circ = 1,86 \quad (45)$$

6.2.2.3 Da Ordem de Ajuste da Proteção

Além dos dados do equipamento obtidos da OAP, devem ser consideradas ainda as informações referentes ao sistema no ponto de conexão. Quando da análise de superação de TCs, precisam ser levados em consideração os seguintes elementos:

- a) Ciclo de operação do disjuntor;
- b) Tempos de atuação da proteção;
- c) Tempo morto.

O ciclo de operação do disjuntor analisado é C-O, ou seja, não há religamento. Foi tomado, então, apenas o tempo de atuação da proteção no primeiro ciclo. A Tabela 8 mostra os valores de ajuste da função 51N para o relé TEAM-ARTECHE PL-250 associado ao TC 01Z1.

Tabela 8 – Valores de ajuste da função 51N para o relé associado ao TC 01Z1

RTC	TAPE (A)	TMS	Temporização
240	0,5	0,39	NI

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Tabela 8, é possível calcular o tempo de atuação da proteção t_{CO} de acordo com a Equação (46).

$$t_{CO} = \frac{\beta \cdot TMS}{M^\alpha - 1} \quad (46)$$

Uma vez que a temporização da função 51N do relé é NI, os valores de β e α equivalem a 0,14 e 0,02, respectivamente. Além disso,

$$M = \frac{I_{CS}}{I_{PICKUP}} \quad (47)$$

Sendo,

$$I_{PICKUP} = TAPE \cdot RTC \quad (48)$$

Antes de substituir os dados de ajuste da Tabela 8 na Equação (46), porém, deve-se comparar o valor de M com o múltiplo de saturação do relé PL-250, o qual, por sua vez, é igual a 40 de acordo com o manual do fabricante.

O valor de M para a corrente de falta I_{CS} é igual à:

$$M = \frac{6231}{0,5 \cdot 240} = 51,93 \quad (49)$$

Como o valor encontrado é maior do que o múltiplo de saturação do relé, deve-se fazer $M = 40$ na Equação (46) para obter o valor t_{CO} . Portanto,

$$t_{CO} = \frac{0,14 \cdot 0,39}{40^{0,02} - 1} \cong 0,72 \text{ s} \quad (50)$$

6.3 Critérios de avaliação

Após o levantamento dos dados do equipamento e do sistema, as equações para a análise da superação de TCs desenvolvidas no Capítulo 4 podem ser aplicadas. Assim como sugerido anteriormente, a avaliação do TC que se apresenta neste capítulo foi dividida quanto aos critérios de suportabilidade de corrente e de verificação de desempenho.

6.3.1 Suportabilidade de corrente simétrica e assimétrica

Na avaliação quanto à suportabilidade de corrente, o TC 01Z1 da SED MCP foi examinado frente às solicitações para corrente de regime nominal, curto-circuito simétrico e curto-circuito assimétrico. Os critérios utilizados foram desenvolvidos ao longo do item 4.2.1 do presente trabalho.

6.3.1.1 Regime normal

Ocorrerá superação do TC na condição de regime normal sempre que a corrente de carga for superior a corrente primária multiplicada pelo fator térmico, ou seja, para valores de:

$$I_{mL} > 1200 \cdot 1,2 \quad (51)$$

$$I_{mL} > 1440 \text{ A} \quad (52)$$

Deve-se calcular, então, o valor da corrente de carga máxima ao qual o TC 01Z1 da SED MCP possa estar submetido.

Em condições de emergência, o transformador 02T1 associado em linha com o TC poderá operar com sobrecarga de até 40% por um período de no máximo 30 minutos, segundo recomendações normativas. Desta forma, a corrente máxima, I_{mL} , de carga pode ser obtida de acordo com a Equação (53).

$$I_{mL} = \frac{1,4 \cdot 15 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 10^3} = 878,58 \text{ A} \quad (53)$$

Como o valor encontrado é inferior ao limite de 1440 A, o TC 01Z1 está adequado quanto à condição de regime nominal. O percentual de superação para esta situação é representado pela Equação (54).

$$PER_1 = \frac{878,58}{1440} \cdot 100 = 61,01\% \quad (54)$$

6.3.1.2 Condição de falta

Nesta seção, o TC 01Z1 da SED MCP será avaliado quanto às condições de faltas simétricas e assimétricas, sendo tomada a pior condição de contribuição pelo TC a partir dos casos rodados no ANAFAS.

6.3.1.2.1 Corrente simétrica

Para ocorrer superação do TC na condição de falta simétrica, o valor da corrente de curto-circuito deverá ser superior ao especificado pela corrente térmica do equipamento. Entre outras palavras, ocorrerá superação sempre que:

$$I_{CS} > 16000 \text{ A} \quad (55)$$

Do item 6.2.2.2, a corrente de contribuição máxima pelo TC foi o valor correspondente ao curto-circuito sob a condição de *line-out*, igual a:

$$I_{CS} = 6231 \text{ A} \quad (56)$$

Como o valor encontrado é inferior ao limite de 16000 A, o TC 01Z1 está adequado quanto à condição de corrente simétrica. O percentual de superação para esta situação é representado pela Equação (57).

$$PER_2 = \frac{6231}{16000} \cdot 100 = 38,94\% \quad (57)$$

6.3.1.2.2 Corrente assimétrica

Ocorrerá superação do TC na condição de falta assimétrica sempre que o pico da corrente de curto-circuito assimétrica for superior ao especificado pela corrente dinâmica do equipamento, ou seja, para valores de:

$$I_{mCA} > 40000 \text{ A} \quad (58)$$

De posse da relação X/R, obtida para a pior condição de contribuição de falta pelo TC, calcula-se a constante de tempo primária.

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot 60} \cdot 1,86 = 0,0049 \text{ s} \quad (59)$$

O valor de pico da corrente de falta assimétrica é, então, calculado para meio ciclo após a incidência da falta. Como a frequência da rede é de 60 Hz, considera-se o instante de 0,0083 s. Assim,

$$I_{mCA} = \sqrt{2} \cdot 6231 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,0083}{0,0049}} \right) = 10431,65 \text{ A} \quad (60)$$

Como o valor encontrado é inferior ao limite de 40000 A, o TC 01Z1 está adequado quanto à condição de corrente assimétrica. O percentual de superação para esta situação é representado pela Equação (61).

$$PER_3 = \frac{10431,65}{40000} \cdot 100 = 26,08\% \quad (61)$$

6.3.2 Verificação de desempenho

Na avaliação quanto à verificação de desempenho, o TC 01Z1 da SED MCP foi examinado frente à resposta para condições de faltas simétricas e assimétricas. Os critérios utilizados foram desenvolvidos ao longo do item 4.2.2 deste trabalho.

6.3.2.1 Saturação para correntes simétricas

Para ocorrer saturação do TC na condição de falta simétrica, o valor da tensão imposta ao secundário deverá ser superior ao especificado pela tensão de saturação do equipamento. Alternativamente, pode-se considerar, para fins de análise, a tensão de saturação como aquele valor obtido no ponto de joelho da curva de excitação.

Segundo Mardegan (2010), como nem sempre se dispõe da curva de saturação do TC para efetuar o cálculo exato da tensão no ponto de joelho, pode-se utilizar a Equação (62) para uma primeira estimativa de V_K .

$$V_K = (R_2 + Z_{2N}) \cdot FS \cdot I_{2N} \quad (62)$$

Deve ser obtida, portanto, a carga padrão ou *burden* nominal do TC. Como a designação da classe de exatidão do TC 01Z1 é 10B200:

$$Z_{2N} = \frac{200}{20 \cdot 5} = 2 \Omega \quad (63)$$

A seguir, dentro das condições previamente estabelecidas, a tensão de saturação é obtida de:

$$V_{SAT} \cong V_K = (0,5878 + 2) \cdot 20 \cdot 5 = 258,78 V \quad (64)$$

Portanto, ocorrerá saturação do TC sempre que:

$$V_{CS} > 258,78 V \quad (65)$$

A tensão imposta ao secundário quando da ocorrência de curto-circuito simétrico é calculada pela Equação (12). Portanto, deve ser obtido o somatório das cargas dos relés e dos cabos, considerando-se que a falta aplicada é do tipo monofásica. Assim,

$$R_B = 2 \cdot 0,2208 + 0,01 + 0,01 = 0,4616 \Omega \quad (66)$$

E, em seguida, o valor da tensão imposta é calculado:

$$V_{CS} = \frac{6231}{240} \cdot (0,4616 + 0,5878) = 27,25 V \quad (67)$$

Como o valor encontrado é inferior ao limite de 258,78 V, o TC 01Z1 está adequado quanto à resposta na condição de falta simétrica. O percentual de superação para esta situação é representado pela Equação (68).

$$PER_4 = \frac{27,25}{258,78} \cdot 100 = 10,53\% \quad (68)$$

6.3.2.2 Saturação para correntes assimétricas

Ocorrerá saturação do TC na condição de falta assimétrica, sempre que o valor da tensão imposta ao secundário for superior ao especificado pela tensão de saturação do equipamento. Novamente, para fins de análise, pode-se considerar a tensão de saturação como aquele valor obtido no ponto de joelho da curva de excitação. Do item anterior, isto significa:

$$E_{AL} > 258,78 V \quad (69)$$

Uma vez que o ciclo de operação do disjuntor é C-O (em outras palavras, como não há religamento), a presente análise foi realizada considerando-se tanto a formulação simplificada como aquela recomendada pela IEC 60044-6.

6.3.2.2.1 Formulação simplificada

A partir da Equação (15), é calculada a tensão imposta ao secundário na condição de falta assimétrica.

$$E_{AL} = 27,25 \cdot (1 + 1,86) = 77,94 \text{ V} \quad (70)$$

Como o valor encontrado é inferior ao limite de 258,78 V, o TC 01Z1 está adequado quanto à resposta na condição de falta assimétrica pelo emprego da formulação simplificada. O percentual de superação para esta situação é representado pela Equação (71).

$$PER_s = \frac{77,94}{258,78} \cdot 100 = 30,12\% \quad (71)$$

6.3.2.2.2 Formulação IEC 60044-6:1992

De acordo com o levantamento das cargas conectadas ao secundário do TC (relé e cabos), presume-se que o valor obtido da resistência é muito superior ao da reatância. Assim, o fator de potência da carga pode ser considerado como unitário.

$$\cos \theta \approx 1 \quad (72)$$

Na determinação da indutância de magnetização, deve-se considerar um ponto de operação pertencente à região linear da curva de excitação do TC. Podem-se tomar, como referência, os dados de $E_S - I_E$ apresentados no Apêndice A, os quais estão relacionados ao TC especificado no presente estudo. Escolhendo, arbitrariamente, o ponto em que a tensão de excitação secundária equivale a 27,30 V, tem-se:

$$L_M = \frac{27,30}{0,0147 \cdot 2\pi \cdot 60} = 4,93 \text{ H} \quad (73)$$

Em seguida, é calculado o valor da constante de tempo secundária a partir da Equação (19).

$$\xi = \frac{4,93}{0,4616 + 0,5878} = 4,6979 \text{ s} \quad (74)$$

Como definido no Capítulo 4, antes de determinar o valor efetivo do fator de dimensionamento transitório, deve-se comparar o tempo de atuação da proteção com o tempo correspondente ao valor máximo de K_{td} . No caso estudado, o valor de tempo correspondente é dado por:

$$t_{mKtd} = \left(\frac{0,0049 \cdot 4,6979}{0,0049 - 4,6979} \right) \ln \left(\frac{0,0049}{4,6979} \right) = 0,0337 \text{ s} \quad (75)$$

Assim, visto que o tempo equivalente ao K_{td} máximo é menor do que o tempo de atuação da proteção deve-se substituir t_{CO} por t_{mKtd} na Equação (16). Portanto,

$$K_{td} = \frac{2\pi \cdot 60 \cdot 0,0049 \cdot 4,6979}{0,0049 - 4,6979} \left(e^{-\frac{0,0337}{0,0049}} - e^{-\frac{0,0337}{4,6979}} \right) + 1 = 2,83 \quad (76)$$

Finalmente, substituindo o valor encontrado na Equação (14), a tensão imposta ao secundário na condição de falta assimétrica é obtida.

$$E_{AL} = 27,25 \cdot 2,83 = 77,12 \text{ V} \quad (77)$$

Como o valor encontrado é inferior ao limite de 258,78 V, o TC 01Z1 está adequado quanto à resposta na condição de falta assimétrica pelo emprego da formulação IEC 60044-6. O percentual de superação para esta situação é representado pela Equação (78).

$$PER_s = \frac{77,12}{258,78} \cdot 100 = 29,80\% \quad (78)$$

6.4 Síntese dos resultados teóricos

Como forma de sintetizar os resultados obtidos da análise do TC 01Z1 da SED MCP, a Tabela 9 mostra o percentual de superação encontrado em cada um dos critérios anteriormente apresentados.

Tabela 9 – Percentual de superação do TC 01Z1 da SED MCP

1º Critério	2º Critério	3º Critério	4º Critério	5º Critério	
				Simplificado	IEC 60044-6
61,01	38,94	26,08	10,53	30,12	29,80

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em que,

1º Critério: superação para regime normal

2º Critério: superação para condição de falta simétrica

3º Critério: superação para condição de falta assimétrica

4º Critério: saturação para correntes simétricas

5º Critério: saturação para correntes assimétricas

Uma vez que os percentuais de superação encontrados foram inferiores a 100%, isto significa que o TC 01Z1 está adequado sob o ponto de vista de todos os critérios de avaliação.

É importante destacar que a análise de superação referente ao 1º Critério (regime normal) foi examinada considerando-se uma sobrecarga percentual de 40% no transformador 02T1. Esse tipo de avaliação, apesar de bastante conservador, é necessário, pois o TC deve permanecer adequado mesmo em condições extremas de operação do sistema.

6.5 Resultados obtidos do PROSUPER

Para que a aplicação desenvolvida no Capítulo 5 esteja apta a ser utilizada como ferramenta de avaliação, é preciso que sejam realizados testes de análises, comparando as respostas obtidas do *software* com aquelas encontradas do equacionamento teórico. Assim, como forma de validar o PROSUPER foi simulado no programa o mesmo caso estudado anteriormente para o TC 01Z1 da SED MCP.

6.5.1 Registro de dados

Iniciou-se esta abordagem com o cadastramento dos dados referentes ao TC e ao sistema no ponto de instalação do equipamento.

As Figuras 45 e 46 apresentam as informações registradas no programa.

Figura 45 – Registro de dados do TC 01Z1 da SED MCP

The screenshot shows the 'PROSUPER' software interface with the following data entered:

Regional:	DMG	Classe de Exatidão:	10B200
Subestação:	MCP	Relações Disponíveis:	200/400/600x400/800/1200-5-5
Código do Equipamento:	01Z1	Corrente Primária Nominal:	1200 [A]
Elemento Associado:	11T1	Corrente Secundária Nominal:	5 [A]
Fabricante:		Resistência Secundária:	0.5878 [Ω]
Tipo:		Resistência Nominal da Carga:	0.4616 [Ω]
Número de Série:		Reatância Nominal da Carga:	0.0000 [Ω]
Manual:			
Norma/Ano:	ABNT NBR 6856 - 04/1992		
Material Isolante:	EPOXI CIC		
Uso:	EXTERNO		
Tensão Máxima do Equipamento:	15 [kV]		
Nível de Isolamento:	34/110/- [kV]		
Corrente Térmica:	16 [kA] ef/1s		
Corrente Dinâmica:	40 [kA] cr		
Fator Térmico:	1.2		
Frequência:	60 [Hz]		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Registro de dados do sistema no ponto de conexão

The screenshot shows the 'Sistema Elétrico - PROSUPER' dialog box with the following data entered:

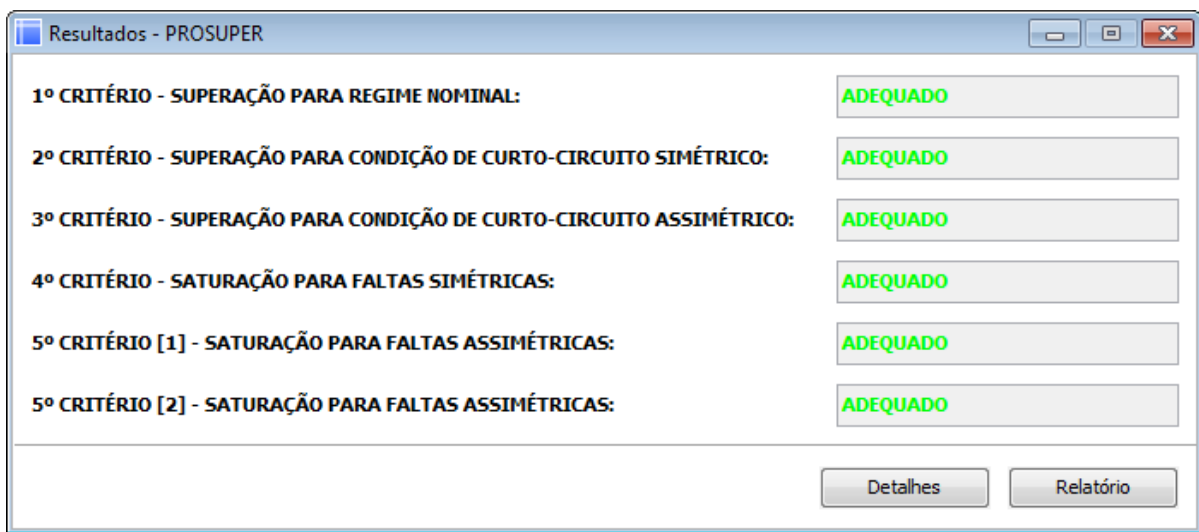
Código do Equipamento:	01Z1
Potência Nominal do Componente em Contingência:	15 [MVA]
Tensão Nominal do Componente em Contingência:	13.8 [kV]
Corrente de Curto-Circuito Simétrico:	6.231 [kA]
Relação X/R:	1.86
Frequência da Rede:	60 [Hz]
Número de Religamentos:	0
Tempo de Atuação da Proteção no Primeiro Ciclo:	0.72 [s]

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.5.2 Módulo de simulação

Após registrar os dados necessários para a análise da superação do TC 01Z1, foi escolhido o método Avaliação completa no menu Analisar. Assim, os mesmos critérios aplicados no capítulo anterior foram desenvolvidos no programa. Os resultados da análise foram obtidos e mostrados na tela, como mostra a Figura 47.

Figura 47 – Resultados da análise do TC 01Z1



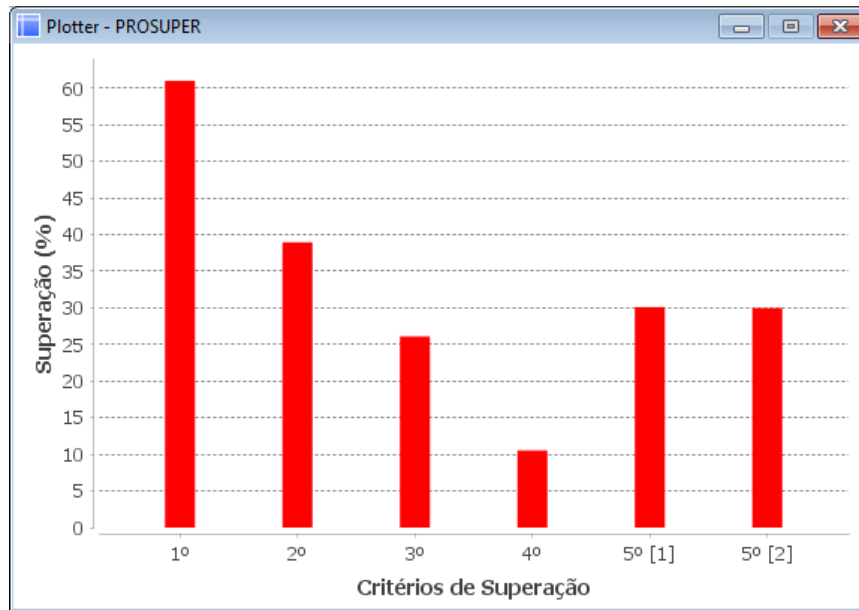
Fonte: Elaborada pelo autor.

A tela de resultados descreve se o equipamento está adequado ou superado em cada uma das condições estabelecidas. A partir da Figura 47, verifica-se que o TC 01Z1 atende a todos os critérios de avaliação.

Para que seja examinado o percentual de superação, a ferramenta gráfica do PROSUPER pode ser utilizada para gerar o gráfico de barras correspondente. A Figura 48 apresenta os resultados do Plotter para a análise em curso.

O PROSUPER, como apresentado no Capítulo 5, é capaz, ainda, de elaborar um relatório técnico contendo as principais informações da análise realizada. O relatório gerado pela avaliação da superação do TC 01Z1 da SED MCP consta no Apêndice H.

Figura 48 – Resultados da análise do TC 01Z1 no Plotter



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.5.3 Comparando os resultados

A Tabela 10 traz um resumo dos resultados obtidos do equacionamento teórico e da ferramenta de cálculo, onde são comparados os percentuais de superação atingidos em cada condição.

Tabela 10 – Comparando os resultados dos métodos de análise

Critérios de Superação	Teoria	PROSUPER	Erro (%)
1º Critério	61,01	61,01	0,00
2º Critério	38,94	38,94	0,00
3º Critério	26,08	26,10	0,08
4º Critério	10,53	10,53	0,00
5º Critério [1]	30,12	30,11	0,03
5º Critério [2]	29,80	29,97	0,57

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível constatar, a partir da Tabela 10, que a aplicação desenvolvida manteve os resultados bem próximos daqueles obtidos anteriormente através dos métodos teóricos, sendo que, em algumas condições, os valores encontrados foram exatamente os mesmos.

6.6 Outras hipóteses de avaliação

Grande parte da literatura indica que é possível garantir a adequação do TC ao avaliar os critérios de superação para o nível de curto-circuito mais severo no ponto de instalação do equipamento. Isto significa que apenas a análise realizada anteriormente para o TC 01Z1 iria classificá-lo como adequado, uma vez que todos os percentuais de superação ficaram abaixo de 100% quando foi considerado o maior valor dentre os três tipos de faltas rodados no ANAFAS, quais sejam: falta na barra, terminal e sob a condição de *line-out*.

Entretanto, dependendo da relação X/R no ponto da falta, haverá uma componente contínua de maior ou menor intensidade na corrente de curto-circuito. Em outras palavras, isto significa que a assimetria da corrente de falta é fortemente influenciada pelo valor de X/R e que avaliar o TC apenas para o maior nível de curto-circuito em termos eficazes não garantirá a adequação do equipamento frente às condições de faltas assimétricas.

Para ratificar esta afirmação, o TC 01Z1 da SED MCP foi novamente examinado. Desta vez, porém, considerando as outras duas condições de faltas descartadas anteriormente.

6.6.1 Falta na barra

Tomando o resultado do caso rodado no ANAFAS para a falta *shunt* aplicada na barra 9024 da SED MCP, o procedimento de avaliação da superação foi outra vez examinado. Os percentuais de superação encontrados em cada critério estão disponíveis na Tabela 11.

Tabela 11 - Percentual de superação do TC 01Z1 da SED MCP para falta na barra

1º Critério	2º Critério	3º Critério	4º Critério	5º Critério	
				Simplificado	IEC 60044-6
61,01	29,43	30,53	7,95	145,89	139,72

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.6.2 Falta terminal

Considerando, agora, o resultado do caso rodado para a falta terminal no disjuntor 11T1 associado ao TC 01Z1 da SED MCP, os procedimentos de avaliação, nesta nova condição, foram novamente examinados. Os percentuais de superação encontrados em cada critério estão disponíveis na Tabela 12.

Tabela 12 - Percentual de superação do TC 01Z1 da SED MCP para falta terminal

1º Critério	2º Critério	3º Critério	4º Critério	5º Critério	
				Simplificado	IEC 60044-6
61,01	29,73	30,84	8,04	147,38	141,15

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.6.3 Discussão dos resultados

As análises da superação do TC 01Z1 realizadas tomando como base os valores da falta na barra e da falta terminal conduziram a problemas que não haviam sido verificados quando utilizado o valor da maior contribuição pelo TC em termos eficazes. Em ambos os casos, tanto para falta na barra como para falta terminal, houve saturação do TC na condição de curto-circuito assimétrico, como pode ser verificado a partir das Tabelas 11 e 12.

Desta forma, é possível ratificar o fato de que, embora a condição para que não haja saturação CA esteja satisfeita, a saturação CC poderá ficar comprometida mesmo quando a avaliação ocorre para valores de corrente simétrica abaixo de 20 vezes a corrente nominal do TC.

6.7 Medidas mitigadoras

Medidas mitigadoras podem ser tomadas para reduzir ou eliminar os problemas da superação de TCs. Neste estudo, serão levados em consideração apenas aspectos operacionais e técnicos. Porém, fatores econômicos, na prática, também podem influenciar nas soluções aceitas pelas comissões das empresas.

A primeira medida – e talvez a mais simples de ser executada – seria a mudança da relação de transformação do TC, aumentando o valor da corrente nominal. O TC 01Z1, no entanto, já está ajustado para a relação máxima 1200-5 disponível para o equipamento.

Uma segunda solução provável seria a troca do equipamento por outro TC que tenha maior valor de tensão secundária nominal. Por exemplo, poderia ser designado um TC 10B400 para esta situação, garantido, assim, maior folga para os valores de pico das correntes de faltas assimétricas.

As análises da superação considerando os mesmos dados da avaliação anterior, somente que com a mudança da designação da classe de exatidão para 10B400, podem ser examinados a partir das Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Percentual de superação do TC 01Z1 classe 10B400 para falta na barra

1º Critério	2º Critério	3º Critério	4º Critério	5º Critério	
				Simplificado	IEC 60044-6
61,01	29,43	30,53	4,49	82,29	78,81

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 - Percentual de superação do TC 01Z1 classe 10B400 para falta terminal

1º Critério	2º Critério	3º Critério	4º Critério	5º Critério	
				Simplificado	IEC 60044-6
61,01	29,73	30,84	4,53	83,13	79,62

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se, portanto, que a solução apresentada conduz a resultados satisfatórios quando comparados com os obtidos anteriormente.

Assim, especificar um TC 10B400 para aplicação no lado de baixa tensão do transformador 02T1, assegura que não haverá superação em nenhum critério, uma vez que, das análises para falta na barra e para falta terminal, todos os percentuais permaneceram com valores abaixo de 100%.

7 CONCLUSÃO

A superação dos TCs pode acarretar na má operação dos dispositivos de medição e proteção, tornando o SEP impreciso e vulnerável. Para que sejam evitados os problemas que estão relacionados com o estado de superação deste equipamento, técnicas de análise devem ser utilizadas para mensurar os níveis de superação de acordo com os critérios estabelecidos por normas.

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, pode-se empregar, por exemplo, a metodologia indicada pela Nota Técnica ONS nº 0048/2014 rev. 2015 para identificar os TCs em potenciais estados de superação. Como destacado, esta nota avalia o equipamento sob dois aspectos: quanto à suportabilidade de corrente e quanto à verificação de desempenho, onde são analisadas as respostas dos TCs junto aos relés de proteção em situações de curto-circuito.

Uma das maiores motivações para o desenvolvimento deste trabalho foi dada a necessidade de se implantar uma aplicação computacional para auxiliar o processo de avaliação de TCs. Como verificado no Capítulo 4, as técnicas de análise podem se tornar, por vezes, exaustivas e impraticáveis – caso não sejam usadas ferramentas de cálculo apropriadas – em sistemas complexos, onde há uma grande quantidade destes equipamentos.

O presente estudo apresentou, para além dos critérios de avaliação, a concepção de um *software* em linguagem de programação Java para examinar e identificar os TCs em situação de superação, na qual foi possível avaliar os resultados da simulação tanto a partir da ferramenta gráfica presente na aplicação como da leitura do relatório técnico de análise.

Um modelo de TC foi implementado no ATPDraw para investigar os efeitos da saturação na forma de onda característica da corrente secundária. Sob este aspecto, foram avaliadas as influências do *burden* do TC e da assimetria da corrente de falta, verificando-se a intensidade das distorções e os impactos provocados na operação dos SEPs.

Por fim, foram aplicadas as técnicas de análise ao sistema elétrico da Coelce, em que as solicitações sobre o TC 01Z1 da SED MCP foram examinadas.

Quando a avaliação foi realizada tomando a maior contribuição da corrente de curto-circuito pelo TC em termos eficazes, todos os critérios de superação permaneceram com seus percentuais abaixo de 100%, garantindo, por um instante, que o TC estava adequado para a aplicação a que foi designado.

Porém, quando a análise foi realizada tomando como referência os valores para falta na barra e falta terminal, o TC 01Z1 apresentou superação na condição de curto-circuito

assimétrico, confirmando o fato de que pode haver saturação CC mesmo quando o critério de 20 vezes a corrente nominal é satisfeito.

De uma forma geral, observou-se que as soluções encontradas da aplicação do PROSUPER foram muito próximas – quando não iguais – às obtidas do equacionamento teórico.

Uma ressalva deve ser feita com relação à aplicação da formulação simplificada do critério de superação para faltas assimétricas sob o aspecto da verificação de desempenho. Apesar de os resultados obtidos da formulação simplificada e daquela recomendada pela IEC 60044-6 terem apresentado valores bastante próximos para o estudo de caso do Capítulo 6, dependendo das condições do sistema – como do tempo de atuação da proteção, ciclo de operação do disjuntor e da relação X/R no curto-circuito – os percentuais de superação das formulações tomadas individualmente poderão apresentar discrepâncias significativas. Para estes casos, a recomendação do ONS é que devem ser considerados os resultados encontrados pela formulação da IEC.

7.1 Propostas para trabalhos futuros

Segundo a lógica desenvolvida neste trabalho e tendo em vista os resultados atingidos, pretende-se conduzir os estudos no sentido de traçar uma metodologia semelhante no que diz respeito à análise da superação de disjuntores de alta tensão. A abordagem poderá seguir a mesma linha descrita para os TCs, na qual foram, primeiramente, apresentadas as condições e a superação e em seguida todos os critérios foram aplicados a uma situação real. Além disso, o ATP poderá ser novamente utilizado. Desta vez, para avaliar, principalmente, as condições da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) do novo equipamento.

Outros tópicos de estudo podem ser trabalhados futuramente no PROSUPER, tais como: adição de técnicas para levantamento das cargas dos TCs, sem que sejam necessários incluí-los em valores previamente estabelecidos; evolução da estratégia do banco de dados para um sistema de gerenciamento *on-line* – como exemplo, pode-se empregar a ferramenta *MySQL*; inclusão da avaliação de superação de disjuntores de alta tensão, tornando-o uma ferramenta cada vez mais completa neste sentido.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856: Transformador de Corrente**. Rio de Janeiro, 1992.
- BELCHIOR, F. N. **Medidas Elétricas**. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying: Principles and Applications**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- COELHO, A. L. M. **Análise da Resposta Transitória de Transformadores de Corrente de Proteção e o Impacto em Relés de Sobrecorrente Numéricos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011a.
- COELHO, V. V. **Estudo da Avaliação de Transformadores de Corrente de Alta Tensão Através da Curva de Excitação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011b.
- EGOROVA, E. O. **ATP Modeling of Internal Transformer Faults for Relay Performance Testing**. Master's report – Michigan Technological University, Houghton, 2011.
- FERREIRA, C. S. **Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito em Redes de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- GRIGOLETTO, F. A. **Análise Comparativa Entre as Metodologias ANSI e IEC para o Cálculo de Curto-circuito em Sistemas Industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- HEWITSON, L.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection**. 1. ed. Oxford: Newnes, 2004.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 100: The New IEEE Standards Dictionary of Electrical and Electronics Terms**. [S.l], 1992.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. C57.13: IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers**. [S.l], 1993.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60044-6: Instrument Transformers - Part 6: Requirements for Protective Current Transformers for Transient Performance**. Genebra, 1992.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60044-1: Instrument Transformers - Part 1: Current Transformers**. Genebra, 2003.

KHAN, S.; KHAN, S.; AHMED, G. **Industrial Power Systems**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2013.

MARDEGAN, C. S. Capítulo I - Transformadores de Corrente, Potencial e Bobinas de Rogowski para Fins de Proteção – Parte 1. **Revista O Setor Elétrico**, p. 22–31, jan. 2010.

MARDEGAN, C. S. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. 1. ed. São Paulo: Atitude, 2012.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. (ED.). **Transient Analysis of Power Systems: Solution Techniques, Tools and Applications**. 1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2015.

MEDEIROS FILHO, S. **Medição de Energia Elétrica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Diretrizes para a Aplicação de Medidas Mitigadoras nos Casos de Superação de Equipamentos de Alta Tensão**, 2006.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Requisitos Mínimos a Serem Observados na Aplicação de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito na Rede Básica**, 2013a.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente**, 2013b.

PRIKLER, L.; HØIDALEN, H. K. **User's Manual ATPDRAW Version 5.6**. Norway, 2009.

RELAY WORK GROUP. **Relaying Current Transformer Application**. Western Electricity Coordinating Council, Salt Lake City, 2014.

ROSELLI, M. A. **Correção da Saturação de Transformadores de Corrente Via Redes Neurais Artificiais e seus Efeitos na Proteção de Distância**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

TAVARES, M. C. D.; CAMPOS, P. G.; PRADO, P. **Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SAWKO, P. **Impact of Secondary Burden and X/R Ratio on CT Saturation**. Faculty of Electrical Engineering, Wroclaw University of Technology, 2003.

SCHETTINO, B. M. **Uma Proposta para Detecção e Compensação dos Efeitos Causados pela Saturação dos Núcleos dos Transformadores de Corrente Utilizados em Circuitos de Proteção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

APÊNDICE A – DADOS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

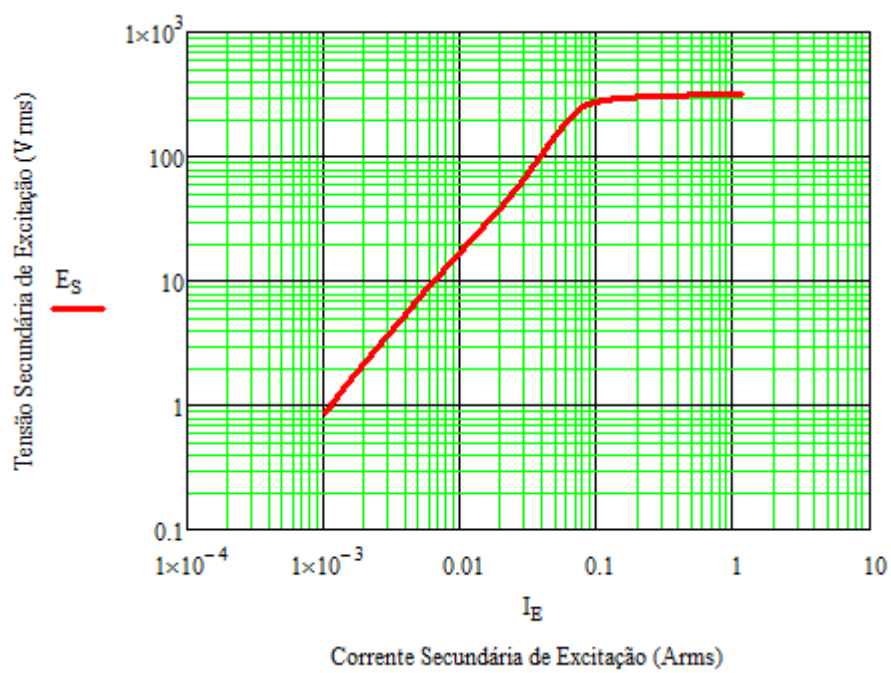
A saturação do TC pode ser avaliada por meio da curva de excitação. A Tabela 15 apresenta a relação $E_S - I_E$ para o levantamento da curva típica de um TC com classe de exatidão de 10B200 e relação de transformação máxima de 1200-5 A, ajustado em 1200-5 A.

Tabela 15 – Relação $E_S - I_E$ para levantamento da curva de excitação típica do TC

E_S (Vrms)	I_E (Arms)
0,88	0,0010
1,33	0,0014
2,05	0,0019
3,14	0,0026
5,26	0,0039
7,94	0,0054
11,98	0,0075
18,07	0,0105
27,30	0,0147
41,22	0,0204
62,27	0,0278
94,01	0,0368
141,77	0,0482
213,53	0,0664
250,92	0,0808
273,58	0,0976
285,22	0,1172
292,09	0,1418
296,90	0,1741
300,69	0,2158
303,56	0,2694
305,99	0,3365
308,40	0,4220
310,71	0,5291
312,86	0,6673
314,79	0,8248
318,12	1,1671

Fonte: Adaptado de EGOROVA (2011).

Figura 49 – Curva de excitação típica do TC



Fonte: Elaborada pelo autor.

**APÊNDICE B – LISTAGEM DO ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP PARA O
CIRCUITO DE TESTE DO INDUTOR NÃO LINEAR *TYPE 93***

BEGIN NEW DATA CASE

C -----

C Generated by ATPDRAW outubro, segunda-feira 3, 2016

C A Bonneville Power Administration program

C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2008

C -----

POWER FREQUENCY 60.

C dT << Tmax << Xopt << Copt >

1.E-6 .1 60.

500 1 1 1 1 0 0 1 0

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C

34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567

890

/BRANCH

C < n1 << n2 <<ref1><ref2>< R << L << C >

C < n1 << n2 <<ref1><ref2>< R << A << B <<Leng><<>0

93XX0001 0.0 1.13 1

0.0 0.0

0.0125 0.0029

0.0411 0.013

0.2336 0.1071

0.5137 0.3258

0.7068 0.4703

0.8219 0.5363

0.9809 0.6038

1.1812 0.6593

1.4361 0.7021

1.7569 0.7346

2.1518 0.76

2.6373 0.7803

3.2206 0.7965

3.9359 0.8105

8.7532 0.8529

9999

XX0002XX0001 .01 0

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

14XX0002 0 80. 60. -1. 1.

/OUTPUT

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

BLANK OUTPUT

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK

**APÊNDICE C – LISTAGEM DO ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP PARA O
SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO**

BEGIN NEW DATA CASE

C -----

C Generated by ATPDRAW outubro, sábado 29, 2016

C A Bonneville Power Administration program

C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2008

C -----

POWER FREQUENCY 60.

C dT << Tmax << Xopt << Copt >

1.E-6 .1 60.

500 1 1 1 1 0 0 1 0

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C

34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890

/BRANCH

C < n1 << n2 ><ref1><ref2>< R << L << C >

C < n1 << n2 ><ref1><ref2>< R << A << B ><Leng><><>0

93XX0008 0.0 1.13 0

0.0 0.0

0.0125 0.0029

0.0411 0.013

0.2336 0.1071

0.5137 0.3258

0.7068 0.4703

0.8219 0.5363

0.9809 0.6038

1.1812 0.6593

1.4361 0.7021

1.7569 0.7346

2.1518 0.76

2.6373 0.7803

```

3.2206      0.7965
3.9359      0.8105
8.7532      0.8529
9999
XX0009XX0001      3.      1
XX0001      .01      0
XX0002      1.E-6      1
XX0008XX0003      .253      0
51X0004AX0006A      .00022 .0025559
52X0004BX0006B      3.9E-5 .001379
53X0004CX0006C
X0006C      29.09 3.1      3
X0006B      30.09 3.1      3
XX0007      32. 1.E-7      3
X0006AXX0005      .35      1
XX0005XX0010      7.2      0
XX0003XX0009      1.E-7      0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP>< type >
XX0007XX0002 .033333 1.      0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14XX0010 1.E-20 60.      -1. 10.
18XX0007 .0125XX0008
14X0004A 0 19516.15 60. -80.      -1. 1.
14X0004B 0 19516.15 60. -200.      -1. 1.
14X0004C 0 19516.15 60. 40.      -1. 1.
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE

```

BLANK

**APÊNDICE D – RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA
MONOFÁSICA NA BARRA MCP 9024**

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas

Pag. 1

REGIONAL - DMG/FTZ - VERSÃO 10 - OUTUBRO/2015

```

=====
=====
ESTUDO CURTO CIRCUITO - (DEZEMBRO/2009)-e-mail CHESF 14/10/2008 -
18:42 (h:m)
COM GERACAO DA KAISER(SE-DID)/VULCABRAS(SE-PCJ)/ASFOR(SE PBR)+EÓLICAS
CONFIGURACAO COELCE - NORMAL
CONFIGURACAO CHESF - GERACAO MAXIMA
500KV MLG/QXA/FZD + SE QXA + LT 230 BNB/MSD + 2LT's FZD/CPE + UTE FTZ
- UTE CE - ARA
EQUIVALENTE          SEQ. POSITIVA          SEQ. ZERO
0 - DMG              Z1=0,32399+J6,9329%    Z0=J42,01%
0 - FTZ              Z1=0,24568+J6,7172%    Z0=J43,23%
FTZ - DMG           Z1=-0,3704+J12,863

```

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto monofasico p/ terra na fase A da barra 9024 (MCP 13.8) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

```

Barra 9024 (MCP 13.8)
TENSÃO (pu)          CORRENTE ( A )
mod.  ang.  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.
ang.
A 0.000  0.0  Z 0.262 -177.3  A 9464 -86.7  Z 3155
-87.3
B 0.968 -114.0  P 0.631  0.6  B 0 0.0  P 3155
-87.3
C 0.934 114.9  N 0.369 179.0  C 0 0.0  N 3155
-87.3

```

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

```

Bar. 9024 (MCP 13.8) TEN.(pu)
mod.  ang.  mod.  ang.
A 0.000  0.0  Z 0.262 -177.3
B 0.968 -114.0  P 0.631  0.6
C 0.934 114.9  N 0.369 179.0

Bar. 9023 (MCP 69) TEN.(pu)  Cir. 1T(02T1 ) CORR.( A )
p/ 9024
mod.  ang.  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.
ang.
A 0.864  38.0  Z 0.000  0.0  A 4708 -86.7  Z 1569
-87.3

```


**APÊNDICE E – RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA
TRIFÁSICA NA BARRA MCP 9024**

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas

Pag. 1

REGIONAL - DMG/FTZ - VERSÃO 10 - OUTUBRO/2015

```

=====
=====
ESTUDO CURTO CIRCUITO - (DEZEMBRO/2009)-e-mail CHESF 14/10/2008 -
18:42 (h:m)
COM GERACAO DA KAISER(SE-DID)/VULCABRAS(SE-PCJ)/ASFOR(SE PBR)+EÓLICAS
CONFIGURACAO COELCE - NORMAL
CONFIGURACAO CHESF - GERACAO MAXIMA
500KV MLG/QXA/FZD + SE QXA + LT 230 BNB/MSD + 2LT's FZD/CPE + UTE FTZ
- UTE CE - ARA
EQUIVALENTE          SEQ. POSITIVA          SEQ. ZERO
0 - DMG              Z1=0,32399+J6,9329%    Z0=J42,01%
0 - FTZ              Z1=0,24568+J6,7172%    Z0=J43,23%
FTZ - DMG           Z1=-0,3704+J12,863

```

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Curto trifasico na barra 9024 (MCP 13.8) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

```

                Barra 9024 (MCP 13.8)
                TENSAO (pu)                CORRENTE ( A )
                mod.  ang.  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.
ang.
A 0.000  0.0  Z 0.000  0.0  A  8547 -86.4  Z  0
0.0
B 0.000  0.0  P 0.000  0.0  B -8547 -26.4  P 8547
-86.4
C 0.000  0.0  N 0.000  0.0  C -8547 -146.4  N  0
0.0

```

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

```

Bar. 9024 (MCP 13.8) TEN.(pu)
  mod.  ang.  mod.  ang.
  A 0.000  0.0  Z 0.000  0.0
  B 0.000  0.0  P 0.000  0.0
  C 0.000  0.0  N 0.000  0.0

Bar. 9023 (MCP 69) TEN.(pu)  Cir. 1T(02T1 ) CORR.( A )
p/ 9024
  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.
ang.
A 0.710  33.6  Z 0.000  0.0  A  4252 -86.4  Z  0
0.0

```


**APÊNDICE F – RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA
MONOFÁSICA SOB A CONDIÇÃO DE *LINE-OUT***

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas

Pag. 1

REGIONAL - DMG/FTZ - VERSÃO 10 - OUTUBRO/2015

```
=====
=====
ESTUDO CURTO CIRCUITO - (DEZEMBRO/2009)-e-mail CHESF 14/10/2008 -
18:42(h:m)
COM GERACAO DA KAISER(SE-DID)/VULCABRAS(SE-PCJ)/ASFOR(SE PBR)+EÓLICAS
CONFIGURACAO COELCE - NORMAL
CONFIGURACAO CHESF - GERACAO MAXIMA
500KV MLG/QXA/FZD + SE QXA + LT 230 BNB/MSD + 2LT's FZD/CPE + UTE FTZ
- UTE CE - ARA
EQUIVALENTE      SEQ. POSITIVA      SEQ. ZERO
0 - DMG          Z1=0,32399+J6,9329%   Z0=J42,01%
0 - FTZ          Z1=0,24568+J6,7172%   Z0=J43,23%
FTZ - DMG        Z1=-0,3704+J12,863
```

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 2 DEFEITOS

- 1) Abertura trifasica junto `a barra 9023 (MCP 69) ligada `a barra 9024 (MCP 13.8) (circ. 1) criando a barra ficticia -1 (FIC.ABERT.01) .
- 2) Curto monofasico p/ terra na fase A da barra 9024 (MCP 13.8) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

```

Barra 9024 (MCP 13.8)
TENSAO (pu)
mod.  ang.  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.
ang.
A 0.000  0.0  Z 0.173 151.8  A 6231 -118.2  Z 2077
-118.2
B 0.912 -136.5  P 0.586 -29.7  B 0 0.0  P 2077
-118.2
C 0.896 76.8  N 0.414 149.6  C 0 0.0  N 2077
-118.2
```

**APÊNDICE G – RESULTADO DO CASO RODADO NO ANAFAS PARA FALTA
TRIFÁSICA SOB A CONDIÇÃO DE *LINE-OUT***

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas

Pag. 1

REGIONAL - DMG/FTZ - VERSÃO 10 - OUTUBRO/2015

```
=====
=====
ESTUDO CURTO CIRCUITO - (DEZEMBRO/2009)-e-mail CHESF 14/10/2008 -
18:42(h:m)
COM GERACAO DA KAISER(SE-DID)/VULCABRAS(SE-PCJ)/ASFOR(SE PBR)+EÓLICAS
CONFIGURACAO COELCE - NORMAL
CONFIGURACAO CHESF - GERACAO MAXIMA
500KV MLG/QXA/FZD + SE QXA + LT 230 BNB/MSD + 2LT's FZD/CPE + UTE FTZ
- UTE CE - ARA
EQUIVALENTE      SEQ. POSITIVA      SEQ. ZERO
0 - DMG          Z1=0,32399+J6,9329%   Z0=J42,01%
0 - FTZ          Z1=0,24568+J6,7172%   Z0=J43,23%
FTZ - DMG       Z1=-0,3704+J12,863
```

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 2 DEFEITOS

- 1) Abertura trifasica junto `a barra 9023 (MCP 69) ligada `a barra 9024 (MCP 13.8) (circ. 1) criando a barra ficticia -1 (FIC.ABERT.01) .
- 2) Curto trifasico na barra 9024 (MCP 13.8) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

```

Barra 9024 (MCP 13.8)
TENSAO(pu)
mod.  ang.  mod.  ang.  mod.  ang.  mod.
ang.
A 0.000  0.0  Z 0.000  0.0  A  5020 -117.9  Z  0
0.0
B 0.000  0.0  P 0.000  0.0  B -5020 -57.9  P  5020
-117.9
C 0.000  0.0  N 0.000  0.0  C -5020 -177.9  N  0
0.0
```

APÊNDICE H – RELATÓRIO TÉCNICO EMITIDO PELO PROSUPER PARA O ESTUDO DE CASO

PROSUPER	
26/10/2016	Página 1
Relatório Técnico de Análise	
Dados da Análise	
Regional:	DMG
Subestação:	MCP
Código do Equipamento:	01Z1
Elemento Associado:	11T1
Dados do Equipamento	
Classe de Exatidão:	10B200
Relações Disponíveis:	200/400/600x400/800/1200-5-5
Fator Térmico:	1.2
Corrente Primária Nominal:	1200 [A]
Corrente Secundária Nominal:	5 [A]
Corrente Suportável Nominal de Curta Duração	16 [kA] ef/1s
Valor de Crista Nominal da Corrente Suportável:	40 [kA] cr
Tensão de Saturação:	258.78 [V]
Resistência Secundária:	0.5878 [Ω]
Resistência Nominal da Carga:	0.4616 [Ω]
Reatância Nominal da Carga:	0.0000 [Ω]
Dados do Sistema Elétrico de Potência	
Potência Nominal do Componente em Contingência:	15 [MVA]
Tensão Nominal do Componente em Contingência:	13.8 [kV]
Corrente de Curto-Circuito Simétrico:	6.231 [kA]
Relação X/R:	1.86
Frequência da Rede:	60 [Hz]

Dados da Proteção

Número de Religamentos: 0
 Tempo de Atuação da Proteção no Primeiro Ciclo: 0.72 [s]

Condições de Superação

1º Critério - Superação para Regime Nominal: $I_{mL} > (I_{1N} * Ft)$
 2º Critério - Superação para Condição de Curto-Circuito Simétrico: $I_{cs} > I_t$
 3º Critério - Superação para Condição de Curto-Circuito Assimétrico: $I_{mCA} > I_d$
 4º Critério - Saturação para Falhas Simétricas: $V_{cs} > V_{sat}$
 5º Critério [1] - Saturação para Falhas Assimétricas: $[V_{cs} * (1 + X/R)] > V_{sat}$
 5º Critério [2] - Saturação para Falhas Assimétricas: $(V_{cs} * K_{td}) > V_{sat}$

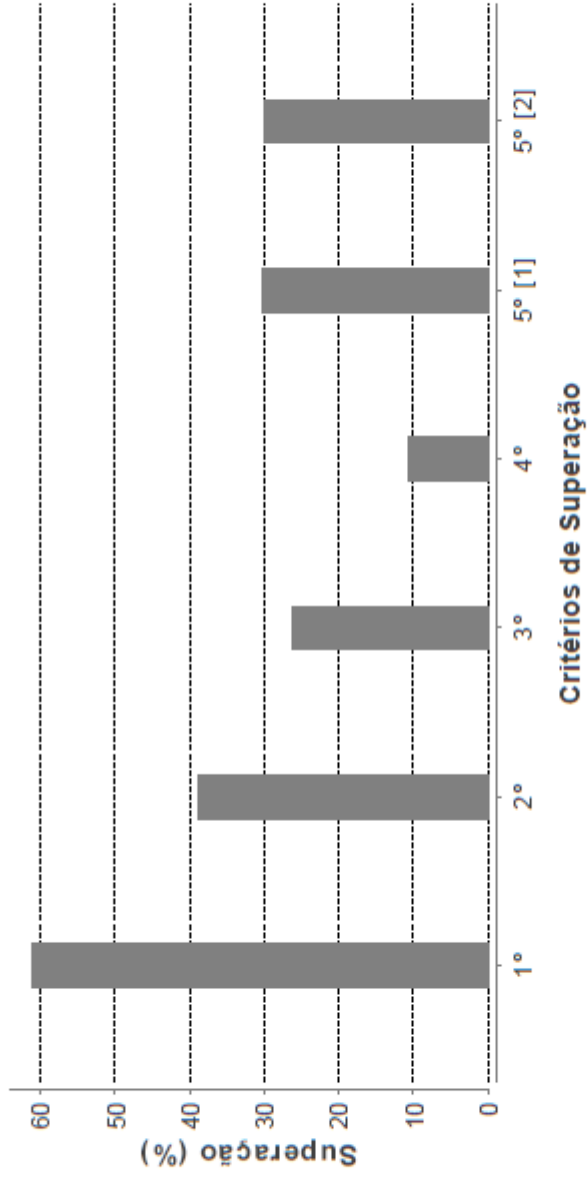
Resultados da Análise

1º Critério - Superação para Regime Nominal: ADEQUADO 61.01%
 2º Critério - Superação para Condição de Curto-Circuito Simétrico: ADEQUADO 38.94%
 3º Critério - Superação para Condição de Curto-Circuito Assimétrico: ADEQUADO 26.10%
 4º Critério - Saturação para Falhas Simétricas: ADEQUADO 10.53%
 5º Critério [1] - Saturação para Falhas Assimétricas: ADEQUADO 30.11%
 5º Critério [2] - Saturação para Falhas Assimétricas: ADEQUADO 29.97%

Notas

- [1] Formulação Simplificada
 [2] Formulação IEC 60044-6

Análise Gráfica

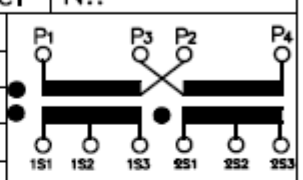


Assinatura

Responsável Técnico

ANEXO A – PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Figura 50 – Placa de identificação do TC 01Z1 da SED MCP

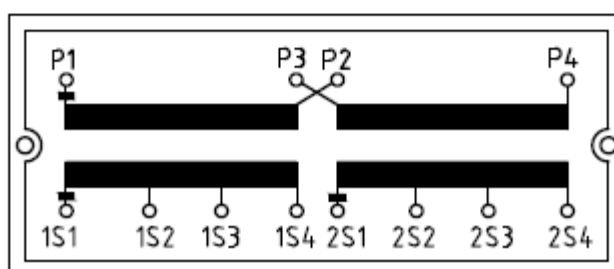
USO EXTERNO	U.M: 15,00	kV	NI:34/110/–kV	f: 60 Hz	Ft: 1,2xIn	TRANSF. CORRENTE	
	Ip: 600X1200–RM	A	Is: 5–5	A	MASSA: 52,5		kg
	EXATIDÃO: 0,6C50–10B200–AUX						
	It: 16,0	kA–1s	Id: 40	kA–cr	N.:		
	TIPO:			MANUAL:			
	P.C.:						
	MAT.ISOL: EPOXI CIC			MES/ANO: 11/14			
	NORMA: ABNT NBR 6856–04/1992						
							

TERMINAIS	RELAÇÃO	EXATIDÃO
1S2–1S3	200x400–5A	----
1S1–1S2	400x800–5A	----
1S1–1S3	600x1200–5A	0,6C50
2S2–2S3	200x400–5A	----
2S1–2S2	400x800–5A	----
2S1–2S3	600x1200–5A	10B200

Fonte: Cortesia da Companhia Energética do Ceará

Figura 51 – Placa de identificação do TC 01Z2 da SED MCP

<input type="text"/> TRANSFORMADOR DE CORRENTE			
TIPO	<input type="text"/>	Nº	<input type="text"/>
ANO	2015		
U _{max}	17,5	kV	USO
			EXTERNO
			NORMA/ANO
			IEC60044
N	38/110	kV	It/Id
			16/40
			kA
			Ft
			1,2
f	60	Hz	MANUAL
			<input type="text"/>
M _{total}	54	kg	ENCOM.
			<input type="text"/>
Ip - Is (A)	LIGAÇÃO SEC.	LIGAÇÃO PRIM.	EXATIDÃO
1200-5A	1S1-1S4	P1-P3/P2-P4	0,5-15VA
800-5A	1S1-1S3	P1-P3/P2-P4	0,5-15VA
400-5A	1S1-1S2	P1-P3/P2-P4	0,5-15VA
600-5A	1S1-1S4	P3-P2	0,5-15VA
400-5A	1S1-1S3	P3-P2	0,5-15VA
200-5A	1S1-1S2	P3-P2	0,5-15VA
1200-5A	2S1-2S4	P1-P3/P2-P4	5P20-15VA
800-5A	2S1-2S3	P1-P3/P2-P4	5P20-15VA
400-5A	2S1-2S2	P1-P3/P2-P4	5P20-15VA
600-5A	2S1-2S4	P3-P2	5P20-15VA
400-5A	2S1-2S3	P3-P2	5P20-15VA
200-5A	2S1-2S2	P3-P2	5P20-15VA



Fonte: Cortesia da Companhia Energética do Ceará