

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
INSTITUTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ENERGIA – ISEE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

*Levantamento da curva de saturação de transformadores de
potência a partir de registros das formas de onda
da tensão e corrente de energização*

Janaina Mirses de Sousa Cruz Costa

Itajubá, dezembro de 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
INSTITUTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ENERGIA – ISEE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Janaina Mirses de Sousa Cruz Costa

***Levantamento da curva de saturação de transformadores de
potência a partir de registros das formas de onda
da tensão e corrente de energização***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges Silva - UNIFEI

Co-orientador: Prof. Dr. Cláudio Ferreira – UNIFEI

Itajubá, dezembro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
INSTITUTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ENERGIA – ISEE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Janaina Mirses de Sousa Cruz Costa

***Levantamento da curva de saturação de transformadores de
potência a partir de registros das formas de onda da tensão
e corrente de energização***

Dissertação aprovada por banca examinadora em 04 de dezembro de 2020, conferindo ao autor o título de Mestre em ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Luiz Eduardo Borges - UNIFEI;

Cláudio Ferreira - UNIFEI

Wilson Cesar Santana - UNIFEI

Mateus Duarte Teixeira - UFPR

Itajubá

2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu amado marido que está sempre ao meu lado, se disponibilizando de maneira incondicional em assumir minhas tarefas domésticas e maternas quando precisei, tornando possíveis minhas conquistas.

A luz da minha vida, minhas filhas Marina e Isadora pela compreensão por minhas ausências em passeios dos finais de semana, necessárias para concluir esse trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Prof. Claudio Ferreira, que me incentivou e me apoiou com imensa dedicação em todas as etapas desse processo.

A Mateus Teixeira, pelo estímulo ao desenvolvimento desta dissertação e pelas expressivas contribuições.

À Companhia Hidroelétrica do São Francisco - Chesf que possibilitou gerenciar o projeto P&D, o qual me conferiu grande aprimoramento técnico e possibilitou o desenvolvimento desse mestrado.

A toda a equipe da Chesf que me deu suporte para o desenvolvimento do projeto, sem o qual não seria possível chegar até aqui.

A equipe do Instituto Lactec que participou desse projeto com excelência profissional e capacidade técnica, o que garantiu o bom resultado aqui apresentado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIFEI pela oportunidade de cursar o Mestrado na área de Sistemas Elétricos de Potência.

Resumo

Os modelos computacionais desenvolvidos para representar os equipamentos elétricos e linhas de transmissão integrantes de um determinado sistema de potência, dependem do conhecimento prévio dos parâmetros necessários para reproduzir o fenômeno elétrico de interesse. Para os estudos de transitórios eletromagnéticos que envolvem a energização de transformadores de potência, como também para reprodução de fenômenos transitórios que são influenciados pelo comportamento não linear desses equipamentos, é necessário modelar com precisão, além dos parâmetros elétricos e tipo de ligação de seus enrolamentos, a curva de saturação do transformador em questão. Para levantamento desses parâmetros é necessário realizar ensaios em laboratório. No entanto, para transformadores de elevados níveis de tensão e potência, as características de saturação do material magnético são geralmente obtidas através de cálculos e estimativas, uma vez que os laboratórios normalmente não possuem potência elétrica suficiente para levar o transformador aos níveis de saturação adequados, o que pode levar a imprecisões.

Diante da preocupação de aumentar a segurança nas decisões operativas dadas a partir de resultados de simulação de estudos de transitórios eletromagnéticos, a Chesf identificou a necessidade de desenvolver uma metodologia que possibilite a medição da curva de saturação de seus transformadores, a fim de aferir as curvas fornecidas pelos fabricantes e obter modelos precisos de transformadores de potência em formato ATP_EMTP.

Assim, foi desenvolvido um dispositivo de medição e um software que permitem o levantamento das características de magnetização de transformadores em operação no sistema elétrico, cuja metodologia escolhida se baseia nas formas de onda da corrente inrush do respectivo transformador. A validação da metodologia foi feita a partir da comparação das formas de onda das grandezas elétricas de interesse, obtidas através de registros em campo, com aquelas obtidas nas simulações computacionais, utilizando o modelo STC do ATP, onde são confrontadas as curvas de saturação levantadas pela aplicação da técnica desenvolvida e a informada pelo fabricante.

Os resultados obtidos mostraram que a metodologia utilizada é robusta e pode ser aplicada a partir dos registros de formas de onda obtidos não só pelo dispositivo de medição desenvolvido como de qualquer oscilo, inclusive os da Rede de Oscilografia.

Palavras-chave – Curva de Saturação, Corrente de Inrush, Transitórios Eletromagnéticos, Medições em Campo.

Abstract

The computational models developed to represent the electrical equipment and transmission lines that are part of a given power system depend on the prior knowledge of the parameters necessary to reproduce the electrical phenomenon of interest. For the studies of electromagnetic transients that involve the energization of power transformers, as well as for the reproduction of transient phenomena that are influenced by the nonlinear behavior of these equipment, it is necessary to model accurately, besides the electrical parameters and type of connection of its windings, the saturation curve of the transformer in question. To carry out these parameters, it is necessary to carry out laboratory tests. However, for transformers of high voltage and power levels, the saturation characteristics of the magnetic material are usually obtained through calculations and estimates, since the laboratories do not usually have sufficient electrical power to bring the transformer to the appropriate saturation levels, which can lead to inaccuracies.

In view of the concern to increase safety in the operational decisions made from simulation results of electromagnetic transient studies, Chesf identified the need to develop a methodology that allows the measurement of the saturation curve of its transformers in order to measure the curves supplied by manufacturers and obtain accurate models of power transformers in ATP_EMTP format.

Thus, a measuring device and software were developed that allow the analysis of the transformer magnetization characteristics in operation in the electric system, whose chosen methodology is based on the inrush current waveforms of the respective transformer. The validation of the methodology was done by comparing the waveforms of the electric quantities of interest, obtained through field records, with those obtained in the computational simulations, using the STC model of the ATP, where the saturation curves raised by the application of the developed technique and that reported by the manufacturer.

The obtained results showed that the methodology used is robust and can be applied from the waveform records obtained not only by the developed measuring device but also from any oscillography, including those Oscillography Network.

Keywords - Saturation Curve, Inrush Current, Electromagnetic Transients, Field Measurements.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO.....	20
1.4 PUBLICAÇÕES RESULTANTES	21
2. ESTADO DA ARTE	23
2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	24
2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA CURVA DE SATURAÇÃO	26
2.2.1 MÉTODO BASEADO NA UTILIZAÇÃO DE DADOS DE PROJETO	27
2.2.2 MÉTODO BASEADO NA APLICAÇÃO DE TENSÃO CONTÍNUA.....	27
2.2.3 MÉTODO BASEADO NA APLICAÇÃO DE TENSÃO AC EM REGIME PERMANENTE (SOBRE-EXCITAÇÃO).....	27
2.2.4 MÉTODO BASEADO NA MEDIÇÃO DA REATÂNCIA A NÚCLEO DE AR.....	28
2.2.5 MÉTODO BASEADO NAS FORMAS DE ONDA DA TENSÃO E CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO (INRUSH).....	28
3. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA - CONCEITOS BÁSICOS	31
3.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP).....	31
3.1.1 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN).....	32
3.2 APLICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA:	32
3.2.1 APLICAÇÃO NO SEP	33
3.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE TRANSFORMADORES	35
3.4 TRANSFORMADOR IDEAL	35
3.5 TRANSFORMADOR REAL	39
3.5.1 PERDAS NO COBRE	39
3.5.2 CORRENTES PARASITAS	40
3.5.3 PERDAS POR HISTERESE	41
3.5.4 PERDA POR DISPERSÃO	45
3.6 CORRENTE DE EXCITAÇÃO	45
3.7 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR REAL	46
3.8 TIPOS DE TRANSFORMADORES	46
3.8.1 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	46
3.8.2 NÚMERO DE ENROLAMENTOS	48
3.8.3 TIPOS DE LIGAÇÃO	48
3.9 CURVA DE MAGNETIZAÇÃO.....	49

3.10	CORRENTE DE INRUSH.....	51
4.	METODOLOGIA PROPOSTA.....	56
4.1	LEVANTAMENTO DA CURVA DE SATURAÇÃO A PARTIR DA CORRENTE DE INRUSH56	
4.2	MEDIÇÃO DA CORRENTE DE INRUSH E DO FLUXO MAGNÉTICO.....	57
4.3	IDENTIFICAÇÃO DOS INSTANTES DE CHAVEAMENTO.....	58
4.3.1	UTILIZAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN.....	61
4.4	OBTENÇÃO DO FLUXO RESIDUAL (Φ_0).....	65
4.5	CORREÇÃO DA CORRENTE DE DELTA.....	69
4.6	RESUMO DA METODOLOGIA.....	71
4.7	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	72
4.7.1	MONTAGEM LABORATORIAL.....	73
4.7.2	TRATAMENTO DOS DADOS.....	74
5.	DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO SATURÔMETRO.....	76
5.1	ESTRUTURA BÁSICA DO DISPOSITIVO SATURÔMETRO.....	76
5.2	FERRAMENTA COMPUTACIONAL SATURÔMETRO.....	78
5.2.1	PLATAFORMA COMPUTACIONAL.....	80
5.2.2	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	80
5.3	MÓDULO DE MEDIÇÃO.....	84
5.3.1	ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE.....	84
5.3.2	ENSAIOS PARA VALIDAÇÃO DO MÓDULO DE MEDIÇÃO.....	86
6.	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	89
6.1	LEVANTAMENTO DA CURVA DE SATURAÇÃO A PARTIR DE DADOS DE SIMULAÇÃO UTILIZANDO O ATP.....	89
6.1.1	CASO A1: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO 15 KVA – 13,8 KV/127 V.....	90
6.1.2	CASO A2: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 50 MVA 230/69KV (Y/ Δ).....	94
6.2	LEVANTAMENTO DA CURVA DE SATURAÇÃO A PARTIR DE DADOS DE MEDIÇÃO EM CAMPO (OSCILOGRAFIA).....	97
6.2.1	TRANSFORMADOR DE 50MVA - 230/69KV (Y- Δ) DA SE CÍCERO DANTAS.....	97
6.2.2	TRANSFORMADOR DE 100MVA - 230/69/13,8KV (Y- Δ -Y) DA SE CATU.....	101
6.2.3	TRANSFORMADOR DE 150MVA (230/69KV) DA SE SANTA RITA II.....	104
7.	ENSAIOS DE CAMPO.....	109
7.1	ENSAIOS NA SE AQUIRAZ II.....	110
7.1.1	DADOS DOS TRANSFORMADORES DA SE AQUIRAZ II.....	111
7.1.2	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA SE AQUIRAZ II.....	112
7.2	ENSAIOS NA SE PICI II.....	115
7.2.1	DADOS DO TRANSFORMADOR 04T4 DA SE PICI II.....	116
7.2.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS NA SE PICI II.....	117

7.3	ENSAIOS NA SE IGAPORÃ II.....	119
7.3.1	DADOS DOS TRANSFORMADORES DA SE IGAPORÃ II	120
7.3.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS NA SE IGAPORÃ II.....	120
8.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E VALIDAÇÃO DO MODELO EM ATP	126
8.1	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS.....	126
8.1.1	SUBESTAÇÃO AQUIRAZ II.....	127
8.1.2	SUBESTAÇÃO PICI II	128
8.2	VALIDAÇÃO DO MODELO DO TRANSFORMADOR 04T1 - SE IGAPORÃ II.....	129
9.	CONCLUSÕES	133
9.1	TRABALHOS FUTUROS.....	135
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

Lista de Figuras

FIGURA 3-1- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO – SEP	31
FIGURA 3-2 – DIAGRAMA UNIFILAR COM OS NÍVEIS DE TENSÃO EM UMA REDE.	34
FIGURA 3-3 – TAP EM TRANSFORMADORES.....	34
FIGURA 3-4 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO – TRANSFORMADOR IDEAL	36
FIGURA 3-5 - BOBINAS DE COBRE – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	40
FIGURA 3-6 – CORRENTES PARASITAS NO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR.....	41
FIGURA 3-7- NÚCLEO LAMINADO DE TRANSFORMADORES	41
FIGURA 3-8 - DOMÍNIOS MAGNÉTICOS DO NÚCLEO DEVIDO À CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO.	42
FIGURA 3-9 – CURVA DE HISTERESE.....	43
FIGURA 3-10 – FLUXO DE DISPERSÃO.....	45
FIGURA 3-11 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR REAL	46
FIGURA 3-12 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COMPOSTO POR TRÊS UNIDADES MONOFÁSICAS	47
FIGURA 3-13 - TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COMPOSTO POR UMA UNIDADE TRIFÁSICA	47
FIGURA 3-14 – AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	48
FIGURA 3-15 – LIGAÇÃO Y-Y	48
FIGURA 3-16 – LIGAÇÃO Δ - Y.....	49
FIGURA 3-17 – LIGAÇÃO Δ - Y.....	49
FIGURA 3-18 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO TÍPICA.....	50
FIGURA 3-19 – CORRENTE DE “INRUSH” DURANTE A ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	52
FIGURA 3-20 –FLUXO VERSUS CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DURANTE A REENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR [24].....	53
FIGURA 3-21 – FLUXO VERSUS CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DURANTE A REENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR [24].....	54
FIGURA 4-1 – COMPOSIÇÃO DA CURVA DE SATURAÇÃO A PARTIR DA CORRENTE DE INRUSH.....	56
FIGURA 4-2 - LIMITAÇÃO DO SINAL DE ABERTURA DO DISJUNTOR	58
FIGURA 4-3 - DETECÇÃO DO INSTANTE DE CHAVEAMENTO DE ACORDO COM A TOPOLOGIA DA SUBESTAÇÃO.	59
FIGURA 4-4 - DETECÇÃO DO INSTANTE DE CHAVEAMENTO A PARTIR DO TRANSITÓRIO DA ONDA DE TENSÃO.	60
FIGURA 4-5 – CÁLCULO DOS RESÍDUOS DO FILTRO DE KALMAN	61
FIGURA 4-6 – PROCESSO DE DEFINIÇÃO DE LIMIAR.....	62
FIGURA 4-7 - EXEMPLO COMPLETO DA UTILIZAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN PARA DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS.....	63

FIGURA 4-8 – DESEMPENHO DO MÉTODO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA (CASO 2) ..	64
FIGURA 4-9 – DESEMPENHO DO MÉTODO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA (CASO 3) ..	64
FIGURA 4-10 – DESEMPENHO DO MÉTODO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA (CASO 4)	64
FIGURA 4-11 – DESEMPENHO DO MÉTODO DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA (CASO 5)	65
FIGURA 4-12 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PROPOSTA PARA DEFINIÇÃO DO FLUXO REMANESCENTE.	66
FIGURA 4-13 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PROPOSTA PARA DEFINIÇÃO DO FLUXO REMANESCENTE.	67
FIGURA 4-14 - ESQUEMÁTICO DA CURVA DE SATURAÇÃO UTILIZANDO A CURVA DO FABRICANTE	69
FIGURA 4-15 - CIRCUITO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COM UM DOS ENROLAMENTOS EM DELTA.	70
FIGURA 4-16 – PROCESSO MEDIÇÃO DA CURVA DE SATURAÇÃO.....	72
FIGURA 4-17– TRANSFORMADOR UTILIZADO NOS ENSAIO DE LABORATÓRIO.	73
FIGURA 4-18 – ESQUEMA LABORATORIAL PARA ENSAIO DE CHAVEAMENTO DE TRANSFORMADOR.....	73
FIGURA 4-19– CURVA DE SATURAÇÃO MEDIDA EM ENSAIO DE LABORATÓRIO.	74
FIGURA 5-1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO “SATURÔMETRO”	76
FIGURA 5-2 – ESQUEMA DO CIRCUITO PARA REGISTRO NAS TENSÕES E CORRENTES	77
FIGURA 5-3 - ESTRUTURA DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL DO SATURÔMETRO	79
FIGURA 5-4 - FLUXOGRAMA DA FUNCIONALIDADE “AQUISIÇÃO DE SINAL”	81
FIGURA 5-5 - FLUXOGRAMA DA FUNCIONALIDADE “GERA CURVA”	83
FIGURA 5-6 –DIAGRAMA EM BLOCOS DA CONFIGURAÇÃO BÁSICA PARA O MÓDULO DE MONITORAÇÃO	85
FIGURA 5-7 - ENSAIO DO MÓDULO DE MEDIÇÃO	87
FIGURA 5-8 – REGISTRO DE TENSÃO SATURÔMETRO VERSUS OSCILÓGRAFO COMERCIAL.	87
FIGURA 6-1- MODELAGEM EM ATP DRAW - CASO A1	90
FIGURA 6-2– MÉTODO DE VALIDAÇÃO A PARTIR DE DADOS DE SIMULAÇÃO.....	90
FIGURA 6-3 – ENERGIZAÇÃO EM 45°	91
FIGURA 6-4– ENERGIZAÇÃO EM 90°.....	92
FIGURA 6-5 – ENERGIZAÇÃO EM 0° E COM DEFINIÇÃO DE INSTANTE DE ENERGIZAÇÃO ERRADO	92
FIGURA 6-6 – ENERGIZAÇÃO EM 0° COM INSTANTE DE ENERGIZAÇÃO CORRETO (APLICADA A CORREÇÃO MANUAL)	93
FIGURA 6-7 – ENERGIZAÇÃO EM 135°.....	94
FIGURA 6-8 – MODELAGEM NO ATP DRAW: ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DA SE CCD.	94
FIGURA 6-9 – MODELO EM ATP DO TRANSFORMADOR 230/69 KV – 50MVA DA SE CCD- CHESF	95

FIGURA 6-10 – CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR SE CCD.	95
FIGURA 6-11 – CURVA DE SATURAÇÃO CONSIDERANDO O INSTANTE DE ENERGIZAÇÃO ANTERIOR AO VERDADEIRO E A TENSÃO PRÉ-DISJUNTOR PARA O CÁLCULO DO FLUXO	96
FIGURA 6-12 – CURVA DE SATURAÇÃO CONSIDERANDO O INSTANTE DE ENERGIZAÇÃO POSTERIOR AO VERDADEIRO E A TENSÃO PRÉ-DISJUNTOR PARA O CÁLCULO DO FLUXO	97
FIGURA 6-13 - DIAGRAMA OPERACIONAL SIMPLIFICADO DO BAY DO TR 04T2 DA SE CCD	98
FIGURA 6-14 – TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CCD – FASE A	98
FIGURA 6-15 – CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CCD – FASE A.....	98
FIGURA 6-16 – TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CCD – FASE B	99
FIGURA 6-17 – CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CCD – FASE B.....	100
FIGURA 6-18 – TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CCD – FASE C	100
FIGURA 6-19 – CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CCD – FASE C.....	100
FIGURA 6-20 - DIAGRAMA OPERACIONAL SIMPLIFICADO DO BAY DO TR 04T1 DA SE CTU	101
FIGURA 6-21– TENSÃO E CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CTU – FASE A.....	102
FIGURA 6-22– CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CTU – FASE A	102
FIGURA 6-23– TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CTU – FASE B	102
FIGURA 6-24– CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CTU – FASE B	103
FIGURA 6-25– TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CTU – FASE C	103
FIGURA 6-26– CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CTU – FASE C	104
FIGURA 6-27 - DIAGRAMA OPERACIONAL SIMPLIFICADO DO BAY DO TR 04TX DA SE SRD	104
FIGURA 6-28 – TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE SRD – FASE A	105
FIGURA 6-29 - CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE SRD – FASE A.....	105
FIGURA 6-30– TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE SRD – FASE B	106
FIGURA 6-31– CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE SRD – FASE B.....	106

FIGURA 6-32– TENSÃO E CORRENTE PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE SRD – FASE C	106
FIGURA 6-33– CURVA DE SATURAÇÃO PARA A ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE SRD – FASE C.....	107
FIGURA 7-1 - DETALHE DO PROTÓTIPO DO SATURÔMETRO MONTADO PARA MEDIÇÃO NAS SUBESTAÇÕES.....	109
FIGURA 7-2 – DIAGRAMA OPERACIONAL DA SE AQUIRAZ II	110
FIGURA 7-3 – FOTOGRAFIA DOS TRANSFORMADORES DA SE AQUIRAZ II.....	111
FIGURA 7-4 –TENSÃO F-T DA BARRA DE 230KV E CORRENTE DE INRUSH NO TR 04T1 DA SE AQD.....	112
FIGURA 7-5 – TENSÃO, CORRENTE DE INRUSH - FASE B E CURVA DE SATURAÇÃO OBTIDA PARA O 04T1 DA SE AQD.....	112
FIGURA 7-6 – COMPARAÇÃO ENTRE A FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE INRUSH REGISTRADA PELO SATURÔMETRO E PELO OSCILO CHESF – 04T1 DA SE AQD ...	113
FIGURA 7-7 – CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR 04T1 DA SE AQD.....	114
FIGURA 7-8 – TENSÃO F-T DA BARRA DE 230KV E CORRENTE DE INRUSH NO TR 04T2 DA SE AQD.....	114
FIGURA 7-9 – TENSÃO, CORRENTE DE INRUSH - FASE C E CURVA DE SATURAÇÃO OBTIDA PARA O 04T2 DA SE AQD.....	115
FIGURA 7-10 – CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR 04T2 DA SE AQUIRAZ – FINAL	115
FIGURA 7-11 – DIAGRAMA OPERACIONAL DA SE PICI II	116
FIGURA 7-12 – FOTOGRAFIA DO TRANSFORMADOR 04T4 DA SE PICI II.....	117
FIGURA 7-13 – TENSÃO F-T DA BARRA DE 230KV E CORRENTE DE INRUSH NO TR DO TR 04T4 DA SE PICI	118
FIGURA 7-14 – TENSÃO, CORRENTE DE INRUSH - FASE B E CURVA DE SATURAÇÃO OBTIDA – 04T4 DA SE PICI	118
FIGURA 7-15 – CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR 04T4 DA SE PICI II.	119
FIGURA 7-16 – DIAGRAMA OPERACIONAL DA SE IGAPORÃ II.....	119
FIGURA 7-17 – TENSÕES NA CT DE 230 KV DO TR 14T1 DURANTE SUA DEENERGIZAÇÃO.	121
FIGURA 7-18 –TENSÃO NA CT DE 230 KV E CORRENTE DE INRUSH DO TR 14T1 DA SE IGD	121
FIGURA 7-19 – TENSÃO, CORRENTE DE INRUSH - FASE A E CURVA DE SATURAÇÃO OBTIDA DO TR 04T1 - SE IGD	122
FIGURA 7-20 – CURVA FINAL DE SATURAÇÃO DO TR 04T1 - SE IGAPORÃ.....	122
FIGURA 7-21 – TENSÕES NA CT DE 230 KV DO TR 04T2 DURANTE SUA DEENERGIZAÇÃO.	123
FIGURA 7-22 – TENSÃO NA CT DE 230 KV E CORRENTE DE INRUSH DO TR 04T2 DA SE IGD	123
FIGURA 7-23 – TENSÃO, CORRENTE DE INRUSH - FASE C E CURVA DE SATURAÇÃO OBTIDA DO TR 14T2 - SE IGD, SEM CONSIDERAR O FLUXO RESIDUAL, CONFRONTADA COM A CURVA DO FABRICANTE.....	124

FIGURA 7-24 – CURVA FINAL DE SATURAÇÃO DO TR 04T2 - SE IGAPORÃ.....	124
FIGURA 8-1 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO: CORRENTES DE INRUSH 04T1 SE AQUIRAZ II.....	127
FIGURA 8-2 – CORRENTE DE INRUSH – SIMULAÇÃO CURVA DO FABRICANTE – SE PICI II	128
FIGURA 8-3 – CORRENTE DE INRUSH – SIMULAÇÃO – SE IGAPORÃ	130
FIGURA 8-4 – CORRENTE DE INRUSH: CURVA DO FABRICANTE E CURVA SATURÔMETRO VS MEDIÇÃO – SE IGD.....	130
FIGURA 8-5 CORRENTE DE NEUTRO: CURVA DO FABRICANTE E CURVA SATURÔMETRO VS MEDIÇÃO – SE IGD.....	131

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a motivação para o desenvolvimento de uma metodologia para levantamento da curva de saturação de transformadores e os objetivos dessa pesquisa , além de apresentar a estrutura deste documento a partir da sinopse de cada capítulo.

1. Introdução

A ampliação do sistema elétrico brasileiro na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tem se dado em um ritmo crescente e acelerado, aumentando a complexidade e os desafios para as áreas de planejamento, operação, supervisão e controle, requerendo grandes esforços dos agentes envolvidos para manter o atendimento à carga sem interrupções e dentro de índices e padrões de qualidade regulamentados no setor elétrico.

Para subsidiar o planejamento e a operação do sistema elétrico de potência é necessário o desenvolvimento de estudos elétricos que possibilite avaliar o comportamento deste, não só em regime de operação normal, mas principalmente durante surtos transitórios provocados por faltas ou por manobras dos equipamentos pertencentes à rede. Os resultados desses estudos possibilitam gerar instruções operativas para garantir um bom desempenho do sistema elétrico associado e definir ajustes das proteções envolvidas, evitando atuações indesejadas de proteção ou danificação de equipamentos. O maior objetivo desses estudos é garantir a disponibilidade dos equipamentos e linhas de transmissão em operação, mantendo, portanto, a confiabilidade, continuidade e qualidade no fornecimento de energia.

Diante desse contexto, os agentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica têm investido em desenvolvimento de modelos matemáticos que representem com fidelidade o comportamento transitório de seus ativos a fim de obter, das simulações computacionais realizadas, resultados cada vez mais precisos. Contudo, a robustez do modelo computacional escolhido para representar o fenômeno de interesse, depende fundamentalmente do conhecimento prévio de parâmetros construtivos, elétricos e magnéticos do equipamento modelado.

Dentro do enorme leque de estudos realizados, estão os estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos os quais avaliam o impacto da integração de um novo equipamento, linha de transmissão ou parque de geração sobre o sistema existente. Para os estudos de energização de transformadores de potência [1], bem como para reprodução de fenômenos transitórios que são influenciados pelo comportamento não linear desses equipamentos, é necessário modelar com precisão, além dos parâmetros elétricos e tipo de ligação de seus enrolamentos, a curva de saturação do transformador em questão. O programa computacional de referência no setor elétrico brasileiro para estudos de transitórios eletromagnéticos é o ATP (Alternative Transients Program) [1]. Um dos modelos

matemáticos utilizados para representação de transformadores de potência é o STC (Saturable Transformer Component).

Nesse contexto, a Chesf realiza, dentre os processos dos estudos pré-operacionais, medições de grandezas elétricas durante a energização de seus transformadores [3], a fim de validar os resultados de simulação a partir da comparação desses com os resultados de medição. Nesse processo foi verificado que em alguns casos não se conseguia reproduzir as formas de onda registradas, principalmente as das correntes de inrush do transformador manobrado. Entre os fatores que poderiam estar influenciando esses resultados, a curva de saturação modelada no ATP, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, poderia ser a causa das divergências encontradas, uma vez que, para grandes transformadores, essa curva é geralmente obtida através de cálculos e estimativas, visto que os laboratórios normalmente não possuem potência elétrica suficiente para levar o transformador aos níveis de saturação adequados para obtenção de dados precisos da curva. Nesses cálculos são levadas em consideração as características ferromagnéticas da chapa do núcleo e da impedância com núcleo de ar (X_{ac}) dos enrolamentos do transformador. Por conseguinte, a utilização desta alternativa naturalmente pode resultar em imprecisão na curva de magnetização, podendo comprometer os resultados de simulação.

Diante desses resultados, a Chesf investiu no desenvolvimento de uma metodologia, através de um projeto P&D - ANEEL, firmado entre a Chesf e o Instituto Lactec, intitulado: Saturômetro – Dispositivo para medir curva de saturação de transformadores, que permite o levantamento das características de magnetização de transformadores em operação no sistema elétrico.

Frente a todos os métodos de medições ou estimação da curva de saturação de transformadores de potência, o método escolhido para desenvolvimento da pesquisa foi o baseado na medição da corrente de inrush, pois alia alta precisão na medição com praticidade. Adicionalmente destaca-se que para a realização deste tipo de ensaio não é demandado o conhecimento prévio das dimensões do ferro e dos enrolamentos dos transformadores, viabilizando um método livre de cálculos e algoritmos complexos. No entanto, tal metodologia traz consigo diversos desafios para sua implantação prática, os quais foram contornados no decorrer do desenvolvimento da dissertação. Os resultados obtidos mostram que a metodologia e dispositivo desenvolvido atenderam de maneira satisfatória às necessidades da Chesf e podem ser aplicados por outras empresas que integram o Sistema Interligado Nacional (SIN).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia, um dispositivo de medição e software robusto de fácil aplicação, que permita às empresas do setor elétrico realizar o levantamento, em campo, da curva de saturação de transformadores de potência em operação, com base nas formas de onda da tensão e da corrente de "inrush" do transformador registradas durante a sua energização, de forma prática e direta. Devendo ser aplicável a qualquer transformador, independentemente do nível das tensões terminais, potência e tipo de ligação dos seus enrolamentos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para se atingir tal propósito, encontram-se a seguir os objetivos específicos desse trabalho:

- Desenvolver um dispositivo para registrar as formas de onda da tensão e corrente do transformador durante sua energização;
- Desenvolver uma ferramenta computacional capaz de:
 - ✓ Criar um banco de dados para cadastrar os transformadores ensaiados.
 - ✓ Armazenar as características do transformador, dados de placa e curva de saturação do fabricante e a levantada pela metodologia.
 - ✓ Tratar os dados de entrada
 - ✓ Ler os registros de tensão e corrente obtidos pelo dispositivo desenvolvido ou pela rede de oscilografia da Chesf, ou seja, que tenha como entrada arquivos em formato Comtrade.
 - ✓ Calcular as características de magnetização dos transformadores, levantar a respectiva curva de saturação e disponibilizar ao usuário o modelo pronto para ser inserido no ATP.
 - ✓ Confrontar a curva de saturação calculada com a fornecida pelo fabricante.
- Realizar ensaios em laboratório, para aferição inicial do dispositivo e software em sua versão inicial;

- Realizar ensaios em campo nas subestações da Chesf para aferir dispositivo e software em sua versão inicial e identificar pontos para aprimoramentos e melhorias;
- Realizar ensaios em campo nas subestações da Chesf para aferir dispositivo e software em sua versão final;
- Validar os parâmetros utilizados no modelo em ATP-EMTP confrontando o resultado de simulações utilizadas nos estudos pré-operacionais para integração de novos transformadores no sistema de transmissão da Chesf com o resultado das medições de campo realizadas por essa empresa.

1.2 Estrutura da Dissertação

Nos capítulos a seguir serão apresentadas todas as etapas realizadas para a definição de uma metodologia adequada para levantamento em campo da curva de magnetização de transformadores de potência, como também as etapas para o desenvolvimento de um dispositivo de medição robusto capaz de registrar as grandezas necessárias e de uma ferramenta computacional para tratamento dos dados e levantamento da curva de magnetização de interesse. Como também, será apresentada a estratégia utilizada para validação da metodologia e ferramentas desenvolvidas e os resultados atingidos.

Capítulo 2 - Estado da Arte: Apresenta a revisão bibliográfica que foi utilizada como referência para o desenvolvimento da metodologia para levantamento da curva de saturação de transformadores a partir da corrente de inrush. Também é apresentado o estado da arte dos métodos empregados para esse fim.

Capítulo 3 - Conceitos Básicos sobre Transformadores de Potência: Apresenta a descrição básica de um sistema elétrico de potência, a função e importância dos transformadores de potência nesse sistema. Também traz uma revisão quanto aos conceitos fundamentais desse equipamento, suas principais características e aplicabilidade, circuito equivalente, formulação e modelos matemáticos.

O Capítulo 4 - Metodologia Proposta: Apresenta os conceitos básicos utilizados no desenvolvimento da metodologia proposta nessa dissertação, as etapas de desenvolvimento e a descrição de todas as adequações que foram necessárias para aplicação no sistema elétrico da Chesf.

O Capítulo 5 - Desenvolvimento do Dispositivo Saturômetro: Apresenta os detalhes da estrutura do hardware e software do dispositivo desenvolvido nesse trabalho para levantamento da curva de saturação de transformadores de potência.

O Capítulo 6 - Validação da Metodologia: Apresenta a validação da metodologia a partir das formas de onda da tensão e corrente de inrush obtidas através de resultados de simulação em ATP, ensaios em laboratório e registros disponibilizados pela Chesf.

O Capítulo 7 - Ensaios de Campo: Apresentada as etapas para aferição e adequações finais do dispositivo desenvolvido através de ensaios realizados em campo, durante a energização de novos transformadores em subestações da Chesf.

O Capítulo 8 - Aplicação da Metodologia e Validação do Modelo em ATP: Apresenta às análises quanto ao impacto nos resultados de estudos pré-operacionais, quando da utilização das curvas de saturação levantadas através da metodologia desenvolvidas nesse trabalho.

O Capítulo 9 - Conclusões: Apresenta as principais conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

1.3 Contribuições desta Dissertação

A metodologia para determinação de curvas de magnetização de transformadores a partir da corrente de inrush, embora sua base já tenha sido apresentada em outros trabalhos [4], foi construída de forma a atender às particularidades das topologias das subestações e tipos de transformadores em operação no Sistema Interligado Nacional (SIN). As rotinas desenvolvidas foram implementadas computacionalmente, disponibilizando uma ferramenta inédita, robusta e de fácil utilização e pode ser aplicada a partir dos registros de formas de onda obtidos não só do dispositivo de medição desenvolvido, como de qualquer oscilo, inclusive os da Rede de Oscilografia presentes nas subestações, podendo ser disponibilizado em qualquer PC.

O equipamento de medição desenvolvido pode ser utilizado como um oscilógrafo comercial, permitindo o monitoramento de diferentes grandezas elétricas de qualquer componente do sistema, além dos transformadores, ampliando sua aplicabilidade.

O dispositivo “Saturômetro” é utilizado pela Chesf nas análises da resposta transitória dos transformadores de potência, possibilitando aferir os respectivos modelos computacionais e, quando necessário, refiná-los garantido assim uma reprodução mais fiel dos fenômenos

transitórios analisados. Adicionalmente, possibilita montar uma base de dados de transformadores. Esse banco de dados pode conter as principais características elétricas e magnéticas, os registros de energização, bem como as curvas de saturação levantada em cada medição, possibilitando verificar possível alteração do comportamento magnético de seus transformadores ao longo dos anos, podendo subsidiar análises realizadas pela área de manutenção.

1.4 Publicações Resultantes

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa foram divulgados em formas de artigos técnicos publicados em congressos nacionais e internacionais, listados a seguir:

- ❖ J. M. S. C. Costa, A. E. Lazzareti, P. A. B. Block, M. D. Teixeira, M. R. Sans, L. F. R. B. Toledo, V. S. Borges, R. C. Scholz, “Uma Proposta de Metodologia para Medição em Campo da Curva de Saturação de Transformadores de Potência”, XXII SNPTEE, Brasília, Brasil, 2013.
- ❖ J. M. S. C. Costa, A. E. Lazzareti, P. A. B. Block, M. D. Teixeira, M. R. Sans, L. F. R. B. Toledo, V. S. Borges, R. C. Scholz, “Modeling of The Saturation Curve of Power Transformers for Eletromagnetic Transient Programs”, T&D 2014 IEEE PES, Medellin, Colombia, 2014.
- ❖ J. M. S. C. Costa, A. E. Lazzareti, P. A. B. Block, M. D. Teixeira, M. R. Sans, L. F. R. B. Toledo, V. S. Borges, R. C. Scholz, “Medição em Campo da Curva de Saturação de Transformadores de Potência”, VII Workspot, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- ❖ J. M. S. C. Costa, A. E. Lazzareti, P. A. B. Block, M. D. Teixeira, M. R. Sans, L. F. R. B. Toledo, V. S. Borges, R. C. Scholz, “Validação da Curva de Saturação de Transformadores de Potência a partir de Medições De Campo”, XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, Brasil, 2015.
- ❖ J. M. S. C. Costa, A. E. Lazzareti, P. A. B. Block, M. D. Teixeira, M. R. Sans, L. F. R. B. Toledo, V. S. Borges, R. C. Scholz, “Saturômetro – Dispositivo para Medir a Curva de Magnetização de Transformadores”, CITENEL, Paraíba, Brasil, 2017.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que foi utilizada como referênciana para o desenvolvimento de uma metodologia para levantamento da curva de saturação de transformadores a partir da corrente de inrush. Também é apresentado o estado da arte dos métodos empregados para esse fim.

2. Estado da Arte

Para os estudos de transitórios eletromagnéticos e a depender do tipo de fenômeno transitório a ser estudado, deve-se escolher o modelo matemático que melhor represente os efeitos não lineares causados pela saturação do núcleo ferromagnético dos transformadores que compõem o sistema elétrico de interesse. Logo, a representação da curva de saturação tem um importante papel na modelagem desses equipamentos. Assim, para que o modelo utilizado reproduza adequadamente a resposta transitória esperada, os parâmetros utilizados no modelo devem ser precisos.

Para pequenos transformadores de potência, as características de saturação do material magnético são geralmente obtidas através de ensaios elétricos simples, para os quais não são necessários equipamentos laboratoriais de grande porte. No entanto, para grandes transformadores, como aqueles empregados no sistema integrado nacional (SIN), cuja tensão no lado de alta dos transformadores é igual ou maior que 230 kV, a curva de magnetização é, na maioria das vezes, obtida através de cálculos e estimativas feitas a partir de dados do comportamento em regime permanente e outros fornecidos pelos fabricantes, uma vez que os laboratórios, normalmente não possuem potência suficiente para levar os transformadores desse porte a níveis de saturação adequados à obtenção da curva de magnetização completa, ou seja, até sua região não linear.

Da mesma forma, mesmo que estas estimativas e alguns ensaios possam definir com certa precisão tal comportamento, este procedimento é realizado pouquíssimas vezes ao longo da vida útil de um transformador e a curva de saturação pode sofrer alterações consideráveis mediante a ação de agentes como correntes de curto-circuito, condição do óleo refrigerante, aumento de temperatura, dentre outros.

Sendo assim, diante da necessidade de se utilizar modelos e parâmetros cada vez mais precisos, torna-se importante a obtenção da curva de saturação de transformadores através de uma metodologia que dispense a necessidade de ensaios laboratoriais, onde os parâmetros dos modelos matemáticos que representam o transformador, especialmente aqueles relacionados ao ramo não linear, possam ser estimados a partir de dados de medições de campo, sem a necessidade de qualquer equipamento externo à subestação. Todavia, a procura por um método que possibilite exatidão no levantamento dessa curva em equipamentos já em operação, ou seja, no campo, sem a necessidade de deslocá-los para laboratórios de pesquisas ou empregar qualquer instrumentação externa às subestações, é um desafio constante para

diversos grupos de pesquisa em todo o mundo e vem sendo estudado nos últimos anos com vistas a refinar os modelos eletromagnéticos empregados em estudos de transitórios.

Apesar de ser uma preocupação antiga de pesquisadores bem como dos profissionais das empresas de energia elétrica, há certa carência de publicações sobre uma metodologia para estimar as características não lineares e a curva de magnetização destes dispositivos a partir de ensaios em campo, sem a utilização de fontes externas e que possam ser empregada a qualquer tipo de unidade, independentemente de seu nível de tensão e potência.

2.1 Levantamento Bibliográfico

Quanto a técnicas desenvolvidas para o levantamento da curva de saturação de transformadores, as publicações concentraram-se essencialmente na utilização de técnicas com o emprego de fontes de corrente contínua [5][6][7] para o levantamento dos parâmetros eletromagnéticos dos equipamentos sob ensaio. Contudo, as técnicas apresentadas não podem ser empregadas na maioria das subestações de transmissão, uma vez que seria necessário deslocamento de grandes fontes a estes locais. Além disso, como em [7], além da fonte, é descrito a necessidade de condições especiais de ensaios em laboratórios não possíveis de serem reproduzidas em campo. Contudo, em [5] temos importantes contribuições, especialmente no que diz respeito ao comportamento e modelagem dos laços de histerese das indutâncias não lineares de magnetização.

A medição de tensão e corrente em regime permanente também é empregada e apresentada em alguns trabalhos [8] [9] para a estimação da curva de saturação e dos laços de histerese. Porém, este método também apresenta falhas, pois, não consegue abranger toda a região de saturação de transformadores, especialmente àquelas atingidas durante fenômenos transitórios. Em [8] é apresentado um procedimento para a representação da curva $i - \lambda$ que também determina as perdas por histerese em condições em que o transformador é alimentado com tensões não senoidais. A aquisição dos sinais, de um transformador alimentado a vazio, é feito em regime permanente para a construção do laço de histerese e apesar do método não retratar com grande precisão a região de saturação, especialmente a região denominada de alta saturação, a técnica de amostragem dos sinais é bastante satisfatória e pôde ser utilizada para desenvolvimento do dispositivo de medição proposto nesta dissertação.

Outras metodologias utilizadas para levantamento da curva de magnetização dependem de dados construtivos [10] para determinação dos parâmetros eletromagnéticos dos transformadores. O método de cálculo da corrente de inrush proposta em [10] é baseado nas

equações de Maxwell e se mostrou bastante eficaz na reprodução de tal fenômeno. No entanto, alguns parâmetros relacionados à impedância da fonte e cabos devem ser considerados na solução de tais equações, e muitas vezes tais dados não são de fácil obtenção em se tratando de uma subestação. Contudo, a metodologia para o cálculo do fluxo residual proposto no trabalho merece atenção e ofereceu boa contribuição para a medição do fluxo residual necessária para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho de mestrado.

Outro método encontrado na literatura é o chamado “Caixa Preta”, o qual utiliza dados de tensão e corrente de entrada do transformador. Neste método o modelo é substituído por um polinômio de ordem superior, que consiga reproduzir o comportamento não linear do transformado, geralmente, à quinta ordem. Em [11] o modelo proposto é construído a partir de equações diferenciais. Porém, para a simulação também é necessário o conhecimento dos parâmetros construtivos.

Com respeito aos trabalhos destinados à modelagem do fenômeno de magnetização, nota-se que a grande maioria dos trabalhos se baseia na teoria de Jiles–Atherton e suas modificações [12]. No entanto, esta teoria, também é dependente de dados construtivos, que muitas vezes não estão disponíveis.

Sendo assim, as referências [4], [13] e [14] são as que mais contribuíram para objetivo deste trabalho, ou seja, obter a curva de saturação de transformadores de Extra Alta Tensão a partir de medições de tensão e corrente durante o processo de energização do mesmo.

Em [13] e [14] são apresentados aspectos quanto ao cálculo das curvas de saturação de transformadores trifásicos conectados em delta a qual trouxe uma boa contribuição para o desenvolvimento da metodologia apresentada nesse trabalho, uma vez que esta precisava ser aplicável em qualquer transformador, com qualquer tipo de enrolamento, inclusive com enrolamentos em delta. Para levantar a curva desse tipo de transformador a partir de sua corrente de inrush, foi necessário considerar que essa corrente é uma composição da corrente de magnetização do núcleo (I_m) e a corrente circulante no delta ($3I_0$).

Outro desafio para o levantamento da curva de magnetização a partir da corrente de inrush é a medição do fluxo residual. Dentre as técnicas que são usadas para se conhecer o fluxo residual presente no núcleo de um determinado transformador, temos:

- a) Utilizando-se uma fonte CA conectada a um dos enrolamentos do transformador, com o outro enrolamento aberto, se reduz gradativamente o valor da tensão até zero volts

($V_1=0V$). Desta forma, o fluxo residual é nulo e a curva de saturação a ser obtida parte também do zero;

- b) Com uma fonte CC aplicada em um dos enrolamentos do transformador ajusta-se o valor da tensão e integra-se este valor para se obter o fluxo residual. Conhecendo-se este valor e polaridade, e controlando-se o momento da aplicação da tensão no enrolamento (chaveamento controlado) pode-se obter a mais alta corrente de inrush possível. Neste caso a curva de saturação partiria do valor do fluxo residual inicialmente calculado, tomando como base o primeiro ciclo das formas de onda de tensão e corrente.

No entanto, ambas as técnicas necessitam de uma fonte de alimentação externa, compatíveis com a potência dos grandes transformadores utilizados nas empresas transmissoras e geradoras de energia.

Alternativas para obtenção do fluxo residual são abordadas nas referências [4] e [15]. A primeira [4], mais empírica, sugere gravar a forma de onda da corrente de inrush durante a energização do transformador e calcular o fluxo em cada intervalo de tempo, assumindo o valor zero para o fluxo residual. Para a corrente de magnetização i_m , dois valores de fluxos são obtidos no primeiro ciclo e, então, é calculada a média destes (ϕ_{med}). O primeiro valor do fluxo é calculado quando a corrente que atinge i_m é ascendente. O segundo valor é calculado quando a corrente que atinge i_m no sentido descendente. Desta forma, o fluxo residual ϕ_0 é igual a $\phi_m - \phi_{med}$. Graficamente, este processo corresponde a um deslocamento vertical da curva de saturação obtida considerando-se o fluxo residual igual a zero. Em [15] são apresentados procedimentos práticos para obtenção do fluxo residual a partir de medições e, apesar desse trabalho ter como foco o chaveamento controlado de transformadores, tal técnica pôde contribuir para os procedimentos propostos por esta dissertação no que tange a medição do fluxo residual.

Do levantamento bibliográfico realizado, foi verificado que os métodos que são utilizados para o levantamento da curva de saturação de transformadores de potência, podem ser resumidos conforme apresentado no item a seguir.

2.2 Métodos de Medição da Curva de Saturação

De maneira geral os métodos empregados, se baseiam em cinco metodologias, conforme apresentado a seguir.

2.2.1 Método baseado na utilização de dados de projeto

Este método é baseado no levantamento da curva de saturação a partir da geometria dos enrolamentos dos transformadores. Todavia, estes dados muitas vezes não estão à disposição dos engenheiros que são os responsáveis diretos pelo planejamento e operação dos sistemas elétricos e os mais interessados em ter estas curvas para utilizar nos modelos computacionais para seus estudos.

Além disso, este método não permite o cálculo exato por não considerar a influência da interação dos diversos enrolamentos dos transformadores.

2.2.2 Método baseado na aplicação de tensão contínua

O método que emprega fontes de Tensão Contínua (fonte CC) para levantamento da curva de saturação de transformadores é baseado no fato de que a fonte CC necessária aos testes é muito menor que uma fonte AC utilizada para se testar o mesmo transformador. Basicamente, o método se fundamenta na conexão de uma fonte CC nos terminais dos enrolamentos de mais alta tensão do transformador, com as correntes e tensão sendo medidas nos enrolamentos de baixa tensão. A curva é então obtida através de um conjunto de equações que aproximam o circuito equivalente do transformador.

Tal método, muito embora consiga uma boa aproximação da real curva de saturação, traz uma série de desvantagens pelo fato de necessitar o isolamento do transformador do sistema, ou seja, a retirada completa de operação do equipamento, além da utilização de um circuito de medição com uma fonte externa à subestação (fonte CC) para executar o levantamento da curva. Este fato o torna um método praticamente laboratorial, trabalhoso de se executar em campo. Outras dificuldades estão relacionadas à medição das correntes e obtenção da curva de saturação de transformadores trifásicos.

2.2.3 Método baseado na aplicação de tensão AC em regime permanente (sobre-excitação)

Este método consiste na aplicação de tensões superiores à tensão nominal aos terminais de um transformador em vazio. Através da medição da corrente de excitação e da integração no tempo da tensão sobre os enrolamentos excitados é obtida a curva de saturação. A maior dificuldade se dá pelo fato deste método ser praticamente inviável para a obtenção da curva de grandes transformadores em laboratórios, devido à classe de tensão e potência demandada na região saturada desses equipamentos. No campo, este teste só poderia ser

realizado em transformadores próximos às usinas geradoras de energia, através de arranjos especiais de alimentação, sendo impraticável a sua realização em transformadores de transmissão.

2.2.4 Método baseado na medição da reatância a núcleo de ar.

Este método é usualmente empregado pelos fabricantes de transformadores como parte dos ensaios para obtenção da reatância a núcleo de ar (saturação) do transformador, especificada pelo comprador. O mesmo consiste basicamente na aplicação de tensão alternada nos enrolamentos do transformador, inicialmente com o transformador praticamente montado e em vazio, elevando-se gradativamente a tensão para um valor de aproximadamente 20% a 30% acima da tensão nominal, valores estes a partir do qual o núcleo ferromagnético inicia o seu processo de saturação, demandando altas correntes de magnetização e distorcendo as formas de onda da tensão aplicada. A partir desta condição, não se torna viável a continuação com este ensaio nesta configuração. Portanto, desmonta-se o transformador, retirando-se a bobina do núcleo ferromagnético e passa-se a aplicar a tensão ao enrolamento retirado, agora sem o núcleo ferromagnético (núcleo de ar). Com este último ensaio obtém-se a reatância núcleo de ar do transformador, que é considerada como sendo a região saturada da curva de magnetização completa do transformador. Assim como outros métodos reportados anteriormente, este método fornece uma aproximação, porém com certo desvio da curva real de magnetização.

2.2.5 Método baseado nas formas de onda da tensão e corrente de energização (inrush)

Esta metodologia [7] é o que apresenta a melhor precisão dentre todos os métodos apresentados anteriormente. Ao se medir as formas de onda da tensão corrente de energização (*inrush*) nos enrolamentos de um transformador e se calcular a integral no tempo da tensão sobre o enrolamento para obtenção do fluxo magnético gerado naquele enrolamento, a curva de magnetização B-H real de cada fase no transformador poderá ser facilmente obtida. Basta construir a curva do fluxo magnético (ϕ) calculado diretamente em função da corrente de *inrush*.

Este método permite a obtenção da curva de magnetização real do transformador, para cada fase, levando em conta simultaneamente a influência de todos os componentes do equipamento, principalmente o efeito do tanque, a configuração do núcleo e a interação entre os enrolamentos. É importante ressaltar que, quanto maior a magnitude da corrente de *inrush*

melhor a medição da região saturada da curva. Ademais, este método não necessita de circuitos ou fontes auxiliares, utilizando-se dos próprios transdutores (TPs e TCs) já instalados nas subestações.

No entanto, o método traz o desafio de se conhecer previamente fluxo residual necessário para se definir o joelho da curva, logo o ponto inicial da região não linear da curva de saturação.

Esse método foi o escolhido para o desenvolvimento desse trabalho de dissertação e para definição dessa escolha, além das vantagens descritas acima, foram realizados primeiramente, testes em laboratório para verificar se a curva medida através dessa metodologia apresentaria as características reais de uma curva de saturação de transformadores de potência.

Contudo, para melhor entendimento das premissas adotadas e da formulação desenvolvida, será apresentada no próximo capítulo uma revisão dos conceitos básicos e matemáticos de transformadores.

CAPÍTULO 3

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Neste capítulo será apresentada a descrição básica de um sistema elétrico de potência, a função e importância dos transformadores de potência nesse sistema. Também traz uma revisão quanto aos conceitos fundamentais desse equipamento, suas principais características e aplicabilidade, circuito equivalente, formulação e modelos matemáticos.

3. Transformadores de Potência - Conceitos Básicos

Neste capítulo será apresentada uma descrição básica quanto a função e importância dos transformadores de potência nos sistemas elétricos de potência. Como também uma revisão dos conceitos fundamentais desse equipamento, suas principais características e aplicabilidade, circuito equivalente, formulação e modelos matemáticos.

3.1 Sistema Elétrico de Potência (SEP)

O sistema elétrico de potência (SEP) é um sistema complexo [16] e trata-se do conjunto de instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, incluindo os sistemas de medição.

Estes sistemas são compostos basicamente por centrais de geração, linhas de transmissão e distribuição, disjuntores, chaves seccionadoras, dispositivos de controle de tensão (capacitores shunts, reatores shunts, compensadores síncronos e estáticos) e transformadores elevadores e abaixadores de tensão. Sendo esse último um dos principais equipamentos do SEP, utilizados nos pontos onde é necessário modificar o nível de tensão do sistema, conforme apresentado no desenho ilustrativo da Figura 3-1.

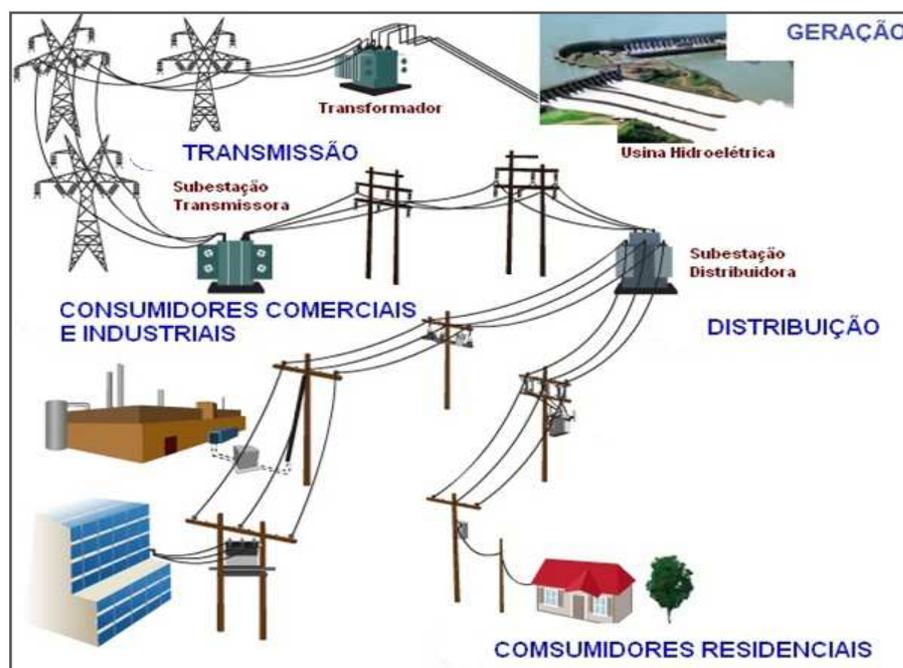


Figura 3-1- Diagrama esquemático – SEP

Fonte: <http://www.adolphoeletricista.com.br/sep/>

O SEP que abrange quase todo o território brasileiro é conhecido como Sistema Interligado Nacional (SIN) e algumas de suas principais características são descritas a seguir.

3.1.1 Sistema Interligado Nacional (SIN)

O Sistema Interligado Nacional tem sofrido grandes modificações e ampliações nas últimas décadas devido ao enorme aumento da demanda de energia elétrica, principalmente nas áreas urbanas e industriais, motivado pelo crescimento da economia brasileira. Para suprir essa demanda crescente, o setor elétrico brasileiro tem investido no aumento da capacidade de geração e conseqüentemente do sistema de transmissão, tendo esse último o papel de transportar um crescente fluxo de potência, mantendo os padrões de qualidade no fornecimento de energia para os consumidores finais, o que tem levado ao SIN ser uma rede de geração e transmissão cada vez mais complexa.

O sistema de produção de energia elétrica do Brasil é um sistema “hidro-termo-eólico-solar” de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. Para ter-se ideia da complexidade e dimensões do SIN, segundo PAR/PEL 2020/2024, espera-se para o ano de 2024, termos uma capacidade instalada de geração de 176.535 MW e com 162.780 km de linhas de transmissão em Corrente Alternada (CA), operado em tensões de 230 kV a 750 kV e 18.748 km de linhas de transmissão em Corrente Contínua (CC), operado em 600 e 800kV [16].

O SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, conectados através de interligações por meio de uma malha de transmissão em 500 kV.

No subsistema Nordeste, a Chesf é a maior empresa de transmissão que opera e mantém o maior parque de usinas hidrelétricas da região. Atualmente possui cerca de 21.000 km de linhas de transmissão em CA, operando nas tensões de 500, 230, 138 e 69 kV. Seu sistema é composto por 128 subestações e quase 62.000 MVA de transformação, cujos transformadores de potência vão de 33MVA a 1200MVA.

3.2 Aplicação dos Transformadores de Potência:

O transformador de potência é definido como um equipamento elétrico estático que por indução eletromagnética modifica a tensão e corrente entre seus enrolamentos sem haver mudança de frequência. É uma máquina considerada de alto rendimento, pois suas perdas são pequenas, o que lhe garante um alto desempenho.

3.2.1 Aplicação no SEP

A principal função dos transformadores de potência presentes no SEP é possibilitar a transmissão de grandes blocos de energia com menos perdas nas linhas de transmissão (LT), pois possuem a capacidade de elevarem a tensão e, conseqüentemente, reduzir a corrente elétrica e manter a mesma potência transmitida à frequência constante (Equação 3.1). Esse equipamento tornou possível o uso de corrente alternada para transmissão de energia, uma vez que as perdas por Efeito Joule¹ em um circuito são proporcionais ao quadrado da corrente, conforme a Equação 3.2.

$$\downarrow I = \frac{S}{V\uparrow} \quad (3.1)$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (3.2)$$

Onde:

I = corrente transmitida pela LT (A);

S = potência aparente (MVA)

V = tensão da rede (V)

P = perda de potência ativa (W);

R = resistência da LT (Ω);

Considerando a questão da redução das perdas resistivas, a fim de aumentar a eficiência da rede no transporte de energia elétrica, a tensão nas subestações de transmissão deve ser a mais elevada possível, porém não é usual se gerar ou consumir energia em elevados níveis de tensão, de forma a ser necessário uso de transformadores elevadores entre a geração e o sistema de transmissão e transformadores abaixadores entre o sistema de transmissão e o de distribuição, conforme pode ser visto no diagrama unifilar da rede representada na Figura 3-2.

¹ **Lei de Joule** é uma lei física que expressa a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. Um resistor é um dispositivo que transforma a energia elétrica integralmente em calor.

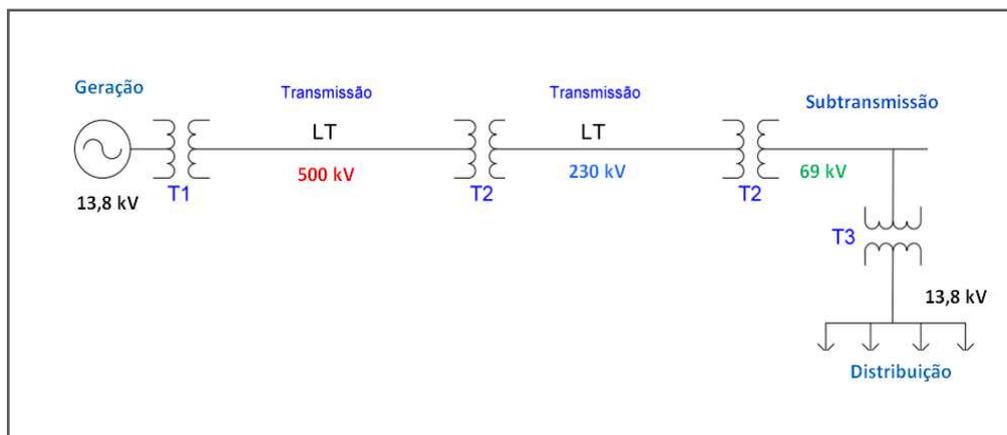


Figura 3-2 – Diagrama unifilar com os níveis de tensão em uma rede.

Fonte: Próprio autor

No SIN desde a geração até os centros de consumo, a tensão passa por pelo menos cinco estágios de transformação, o que implica que a quantidade em MVA nominal de todos os transformadores no sistema é cerca de cinco vezes a potência nominal de todos os geradores

O sistema atualmente operado e mantido pela Chesf tem 10.323,43 MW em potência total instalada em seu parque gerador e possui uma capacidade de transformação de 55.957MVA.

Além disso, os transformadores têm um papel fundamental no controle de tensão e do fluxo de potência reativa dos sistemas de transmissão e distribuição por dispõem de comutadores sob carga, “Load Tap Change” (LTC). Esses comutadores permitem elevar ou reduzir a tensão transformada, através da variação do número espiras de um dos enrolamentos do transformador, excursionado em TAPs, modificando assim a relação de transformação, conforme mostrado na Figura 3-3

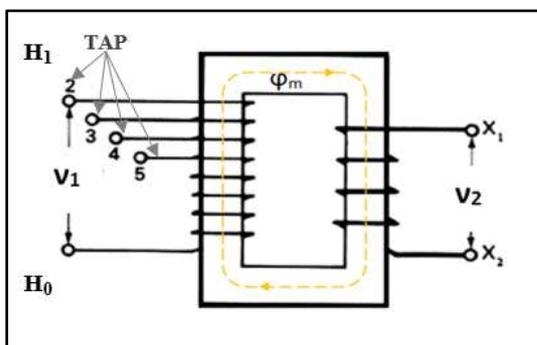


Figura 3-3 – TAP em Transformadores

Fonte: Próprio autor

O LTC é um dispositivo que permite a mudança automática de TAP estando o transformador em carga e é utilizado para manter a tensão regulada em um determinado barramento, corrigindo automaticamente a variação de tensão causada pela queda de tensão ao longo de um circuito ou pela variação do montante de carga (MW e Mvar) alimentado pelo transformador.

3.3 Princípios Básicos de Transformadores

Inventado em 1831 por Michael Faraday, os transformadores tem seu funcionamento baseado nos princípios eletromagnéticos da Lei de Faraday-Neumann e da Lei de Lenz. Faraday, Franz Ernst Neumann e Heinrich Lenz, entre 1831 e 1845, quantificam a indução eletromagnética.

A lei de Faraday-Neumann, também chamada de lei da indução magnética, relaciona a força eletromotriz gerada entre os terminais de um condutor submetido à variação de fluxo magnético, em função do intervalo de tempo que esta variação acontece, conforme descrito na Equação 3.3. O sinal negativo é uma consequência da Lei de Lenz: O sentido da corrente é o oposto da variação do campo magnético que lhe deu origem.

$$e = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Onde:

e = força eletromotriz;

$\Delta\phi$ = variação de fluxo

Δt = intervalo de tempo

Basicamente um transformador é constituído por dois ou mais enrolamentos, acoplados através de um núcleo construído em material ferromagnético. Cada enrolamento é formado por várias bobinas, que em geral, são feitas por fios de cobre eletrolítico revestido de verniz sintético para prover o isolamento elétrico. Geralmente, o enrolamento onde é conectada fonte de tensão é chamado lado primário e os demais recebem o nome de secundário e terciário a depender da quantidade de enrolamentos.

3.4 Transformador Ideal

Um transformador é definido como ideal quando consideramos as resistências elétricas dos enrolamentos desprezíveis; fluxo magnético totalmente concatenado no núcleo, tendo esse

uma permeância infinita não produzindo perdas por Foucault ou por histerese. Essas premissas são válidas para obter algumas considerações matemáticas, como as consideradas no diagrama esquemático de um transformador ideal de dois enrolamentos apresentado na Figura 3-4.

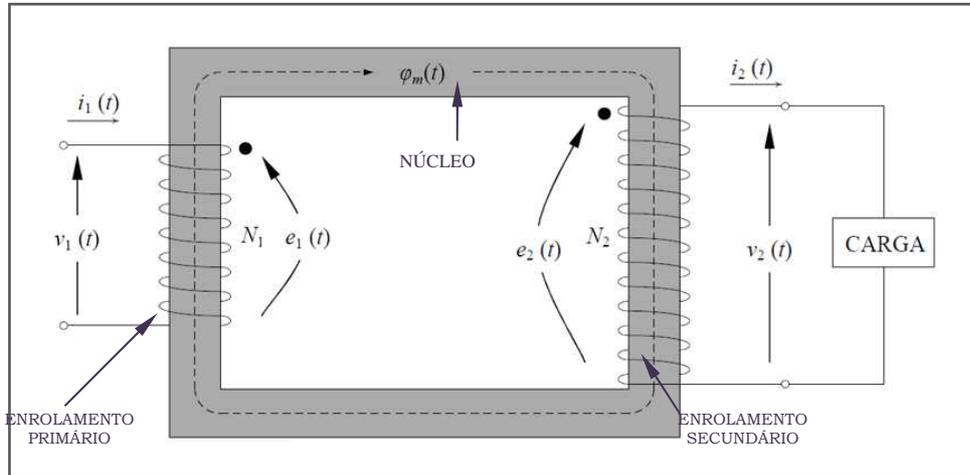


Figura 3-4 - Diagrama esquemático – Transformador Ideal
 Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Eletric Machinery Fundamentals

Onde:

$v_1(t)$ = tensão alternada aplicada ao primário;

$i_1(t)$ = corrente alternada que circula no enrolamento primário;

N_1 = número de espiras do enrolamento primário;

$e_1(t)$ = força eletromotriz (fem) que surge no primário;

ϕ_m = Fluxo magnético concatenado no núcleo do transformador;

$v_2(t)$ = tensão alternada que surge no secundário por indução;

$i_2(t)$ = corrente alternada que circula no secundário;

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário;

$e_2(t)$ = força eletromotriz que surge no secundário;

De forma que, aplicando-se no enrolamento primário uma tensão alternada $v_1(t)$ de frequência angular ω , conforme Equação 3.4, um fluxo magnético circulará pelo núcleo ferromagnético do transformador, cujo valor pode ser calculado pela Equação 3.5.

$$v_1(t) = V_1 \text{ sen}(\omega t) \quad (3.4)$$

$$\phi_m = \frac{V_1}{\omega N_1} \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

O fluxo ϕ_m que circula através do núcleo pelo enrolamento primário e secundário faz surgir uma força eletromotriz em seus terminais. No entanto, a tensão que surge no primário (e_1) se opõe à tensão da fonte ($v_1(t)$) no sentido de anulá-la, de acordo com a Lei de Lenz.

Partindo-se da Lei de Faraday, sendo o enrolamento primário composto por N_1 espiras e o secundário N_2 espiras, a tensão induzida (e) nos terminais desses enrolamentos será dada, respectivamente por:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (3.6)$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Como se trata de um transformador ideal, pode-se desprezar as perdas de forma que:

$$e_1(t) = v_1(t) \quad (3.8)$$

$$e_2(t) = v_2(t) \quad (3.9)$$

Fazendo a relação entre as equações 3.6 e 3.7 e com a consideração das equações 3.8 e 3.9, temos relação de transformação de um transformador, chamada de a:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3.10)$$

Da equação 3.11, verifica-se que a relação de transformação da tensão entre os enrolamentos de um dado transformador depende apenas da relação do número de espiras de cada enrolamento.

Uma das equações bastante utilizada para definir as tensões nos terminais de um transformador, em valores RMS², desde que se conheça a amplitude do fluxo magnético (ϕ_m), o número de espiras do enrolamento (N) e a frequência da rede (f), é dada por:

$$E_{1RMS} = \frac{2\pi f N_1 \phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \phi_m \quad (3.11)$$

Essa equação pode ser aplicada para qualquer um dos terminais do transformador e através dela observa-se que a amplitude da tensão terminal induzida é diretamente

2 O RMS (Rood Mean Square) ou valor eficaz de uma onda periódica de tensão apresenta o valor de uma grandeza contínua que produz a mesma dissipação térmica de potência da grandeza periódica, expressa por .

$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$. Essa definição também se aplica à corrente.

proporcional à frequência da rede, ao número de espiras do respectivo enrolamento e ao fluxo concatenado no núcleo do transformador.

Estando o transformador em vazio, ou seja, sem carga, a corrente que circula no primário (i_1) é igual à corrente necessária para magnetizar o núcleo (i_m), e a corrente que circula no secundário (i_2) é igual a zero. Considerando, porém, uma carga acoplada no secundário do transformador, de impedância Z_c , circulará uma corrente de carga (i_c), dada por:

$$i_c = -i_2 = \frac{e_2}{z_c} \quad (3.12)$$

A corrente que circula no secundário produzirá uma força magneto motriz (F), dada por:

$$F_2 = N_2 \cdot i_2 \quad (3.13)$$

Essa força, segundo a lei de Lenz, tende a se opor na tentativa de desmagnetizar o núcleo. Porém, como há uma fonte aplicada no primário v_1 , de acordo com a lei de Faraday, o fluxo tende a se conservar e para isso absorve a corrente que circula no primário. De forma que se tem:

$$F_1 = N_1 \cdot i_1 \quad (3.14)$$

Como em um transformador ideal a permeabilidade (μ) é infinita, a relutância (R) tende a zero, uma vez que:

$$R = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} = \frac{F}{\varphi} \quad (3.15)$$

Onde:

R = Relutância magnética (Ae/Wb);

l = comprimento do circuito magnético (m);

μ_0 = permeabilidade do vácuo, igual $4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/ ou Wb/m);

μ_r = permeabilidade magnética relativa do material (adimensional);

A = área da secção transversal (m²).

F = força magnetomotriz (Ampére-espira)

Logo se pode considerar que:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_m \quad (3.16)$$

$$N_1 \cdot i_1 = -N_2 \cdot i_2 \quad (3.17)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -\frac{1}{a} \quad (3.18)$$

Outra definição importante é quanto à densidade de fluxo magnético (B), que é dada pela seguinte relação:

$$B = \frac{\phi_m}{A} \quad (3.19)$$

A partir da Equação 3.14, pode-se relacionar a densidade de fluxo com a força magneto motriz:

$$B = \frac{F \cdot \mu}{l} = \frac{N \cdot i \cdot \mu}{l} \quad (3.20)$$

Tem-se ainda a força magnetizante (H) que define a força necessária para manter o campo magnético induzido pela corrente elétrica que circula da bobina e que é independente da permeabilidade magnética do material.

Sendo a força magnetizante (H) dada por:

$$H = \frac{N \cdot i}{l} \quad (3.21)$$

Temos:

$$B = \mu \cdot H \quad (3.22)$$

Onde:

B = densidade do fluxo magnético (Tesla);

H = força magnetizante (A/m);

3.5 Transformador Real

Para a representação de um transformador real através de um circuito equivalente é necessário considerar que existem perdas no cobre e no ferro e os fluxos concatenados em cada enrolamento não são os mesmos, uma vez que há um fluxo de dispersão em cada um deles.

3.5.1 Perdas no cobre

Cada um dos enrolamentos é composto de espiras formadas por fio de cobre, conforme mostrado na Figura 3-5, e devido à resistividade do material condutor utilizado na fabricação

dos enrolamentos, ao circular corrente aparecerão perdas de efeito Joule sendo essas proporcionais ao quadrado da corrente alimentada pelo transformador.



Figura 3-5 - Bobinas de cobre – transformador trifásico

Fonte: <http://www.data.com.br>

Essas perdas, portanto, poderão ser representadas no circuito equivalente como resistências em série, uma vez que são proporcionais à corrente de carga. Podendo ser calculadas por:

$$P = Ri^2 \quad (3.23)$$

Já as perdas no ferro são associadas à variação do fluxo magnético que percorre o núcleo, logo são função da tensão. Essas perdas são classificadas como perdas por correntes parasitas e perdas por histerese.

3.5.2 Correntes Parasitas

As perdas no ferro por efeito Joule são originadas por correntes parasitas, também conhecidas como corrente de Foucault. São geradas devido ao fluxo variável mantido no núcleo que induz tensões ao longo do material ferromagnético e sendo este um material condutor, essas correntes circulam no núcleo e dissipam calor, podendo ser modeladas por meio de uma resistência. Essas dependem do volume e das características construtivas do material do núcleo, do valor da densidade do fluxo magnético (B) e da frequência (f).

Para reduzir esse efeito, os transformadores possuem um núcleo composto por lâminas, a fim de diminuir a área a qual essas correntes parasitas circulam. Essas lâminas são agrupadas em sentidos opostos de forma que uma corrente tende a anular a outra, diminuindo seu efeito e portanto as perdas a elas associadas, conforme Figura 3-6.

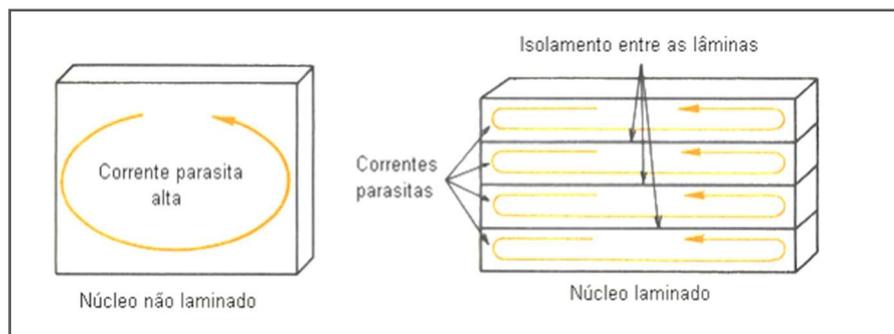


Figura 3-6 – Correntes parasitas no núcleo do transformador

Fonte: <http://www.ezuim.com/pdf/trafos.pdf>

Vale salientar que o núcleo é laminado no sentido do fluxo magnético e perpendicular ao sentido das correntes parasitas. Quanto ao material magnético, são utilizadas ligas de aço silício, compostas de ferro, silício e carbono, resultando em um material que possui uma resistência elétrica mais elevada que o ferro e assim reduz a intensidade das correntes parasitas [17], conforme mostrado na Figura 3-7. O emprego desse material também favorece a redução das perdas por histerese.

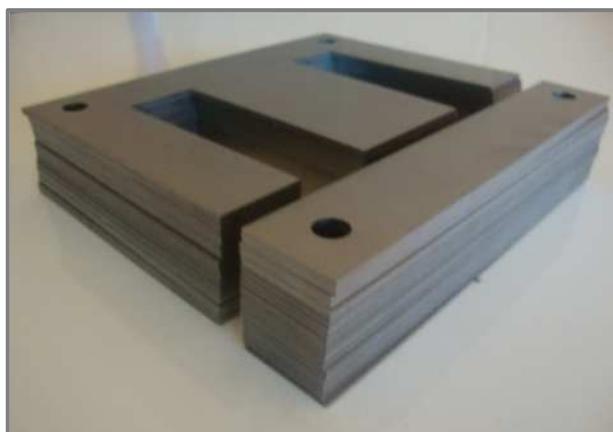


Figura 3-7- Núcleo laminado de transformadores

Fonte: https://http2.mlstatic.com/d_nq_np_20421-mlb20190770934_112014-o.jpg

3.5.3 Perdas por Histerese

A palavra "histerese" deriva do grego que significa 'retardo', que foi definida por Sir James Alfred Ewing em 1890. Esse fenômeno causa um atraso entre densidade de fluxo e o campo magnético [18].

As perdas por histerese são provocadas pela rearrumação dos momentos magnéticos do material ferromagnético que compõe o núcleo do transformador. A energia gasta no realinhamento é transformada em calor e depende do tipo do material magnético empregado na fabricação e da frequência da tensão aplicada nos terminais do transformador.

Conforme diagrama apresentado na Figura 3-4, aplicando-se uma tensão alternada senoidal no terminal primário do transformador (v_1), aparecerá a corrente i_1 e considerando o transformador em vazio, ou seja, sem carga, i_1 será igual a corrente de magnetização (i_m) que é responsável pela magnetização do núcleo ferromagnético do transformador. Essa corrente pode ser relacionada com a força magnetizante H , conforme Equação 3.24:

$$H = \frac{N_1}{l} \cdot i_m \quad (3.24)$$

Conforme mostrado na Figura 3-8, a cada inversão no sentido da onda senoidal, os momentos magnéticos invertem sua orientação, onde se observa que a força de magnetização que mantém os domínios alinhados é anulada na passagem da corrente pelo zero, ou seja, em 0° , 180° e 360° .

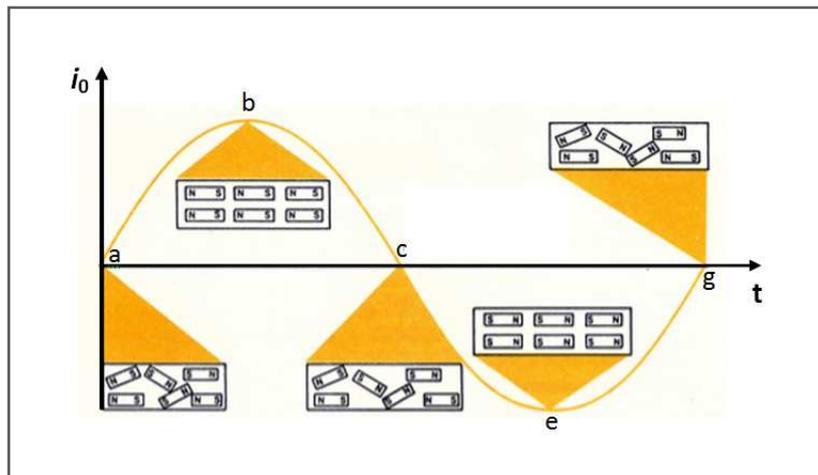


Figura 3-8 - Domínios magnéticos do núcleo devido à corrente de magnetização.

Fonte: <http://www.ezuim.com/pdf/trafos.pdf>

O processo de magnetização de um material ferromagnético é caracterizado pela relação $B \times H$, dada pela Equação 3.21. Graficamente as curvas formadas por essa relação são conhecidas como curvas de histerese ou curva de magnetização, cujo comportamento é apresentado na Figura 3-9.

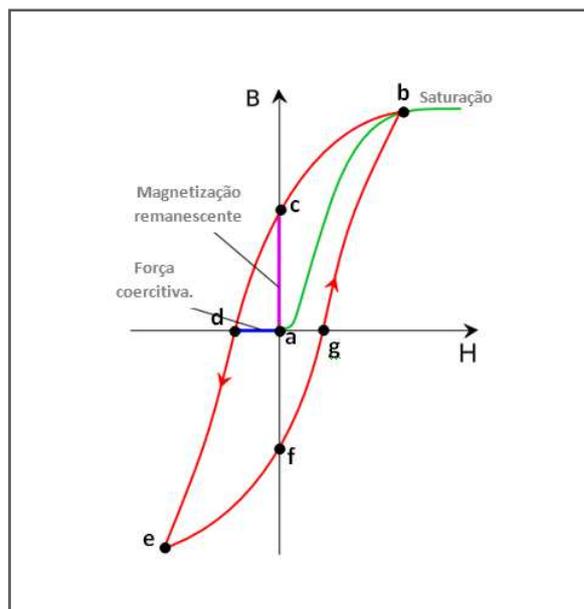


Figura 3-9 – Curva de histerese

Fonte: Próprio autor

No instante inicial da curva de histerese (**ponto a**) o núcleo se encontra desmagnetizado, portanto, $H = B = 0$.

Quando aplicada tensão V_L , a corrente de magnetização, i_m , começa a crescer até seu pico máximo no semiciclo positivo. O campo magnético acompanha este crescimento atingindo também o seu valor máximo (**ponto b**), podendo atingir sua região de saturação³. Após atingir o pico, a corrente vai decrescer até o zero, de forma que H reduz até zerar (**ponto c**). Contudo, é mantida uma densidade de fluxo de polaridade positiva, o qual é chamado de fluxo remanescente (B_r). Devido a corrente passar para seu ciclo negativo a força de magnetização (H) vai inverter o seu sentido e essa força como é contrária àquela que criou o fluxo remanescente vai anular B_r , gerando o ponto d . A força magnetizante suficiente para zerar o fluxo remanescente é chamada de força coercitiva. Após esse instante a corrente continua crescendo até atingir seu máximo negativo e faz com que H e B atinjam seu valor máximo, porém com polaridade invertida.

No segundo ciclo da corrente, a curva é fechada, originando um laço de histerese. Este laço se obtém quando o material se acha em estado de magnetização cíclica. De forma que, como a corrente i_0 que cria o campo magnético é senoidal, com frequência f , existem f ciclos de magnetização por segundo. Isto faz com que a dissipação de energia, devido à força

³ Quando todos os momentos magnéticos se encontram alinhados com o campo magnético a que estão submetidos, não mais contribuindo para aumento significativo na densidade do fluxo, o material é dito saturado.

empregada para a orientação dos domínios do material magnético é f vezes a dissipada no primeiro ciclo. Logo quanto maior a frequência maior as perdas por histerese.

Segundo [19], considerando que o fluxo magnético concatenado no núcleo é igual, estando o transformador em carga ou em vazio, as perdas por histerese podem ser calculadas pela equação empírica 3.25:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot \beta_m^y \quad (3.25)$$

Sendo:

P_h = perdas por histerese (Watt/kg);

K_h = coeficiente de Steinmetz (depende do material);

β_m = Densidade máxima do fluxo magnético (T);

$y = 1,6$ para $\beta_m \leq 1T$ e 2 para $\beta_m \geq 1T$

f = frequência (Hz).

Segundo [20], as perdas totais no núcleo podem ser expressas, de forma aproximada, por.

$$P_{fe} = K \cdot B_m^2 \quad (3.26)$$

Das equações 3.10 e 3.18, tem-se que:

$$B = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot A} \quad (3.27)$$

Substituindo a equação 3.26 em 3.27, podem-se definir as perdas no núcleo pela Equação 3.28, onde a constante K' tem dimensão de condutância, logo podemos considerar que $k' = 1/r_p$, sendo, portanto, r_p a resistência equivalente às perdas no ferro, conforme Equação 3.29.

$$P_{fe} = K' \cdot E_1^2 \quad (3.28)$$

$$P_{fe} = \frac{E_1^2}{r_p} \quad (3.29)$$

As perdas no ferro serão representadas no circuito equivalente como uma resistência equivalente em paralelo com a fonte, pois depende de E_1 .

3.5.4 Perda por dispersão

Nem todo fluxo gerado consegue ficar concatenado no núcleo, pois em um transformador real a permeabilidade (μ) não é infinita, portanto o material constituinte do núcleo impõe uma relutância (R) e parte das linhas de fluxo se dispersa pelo ar e não contribui para o acoplamento magnético entre os enrolamentos do transformador, conforme apresentado na Figura 3-10.

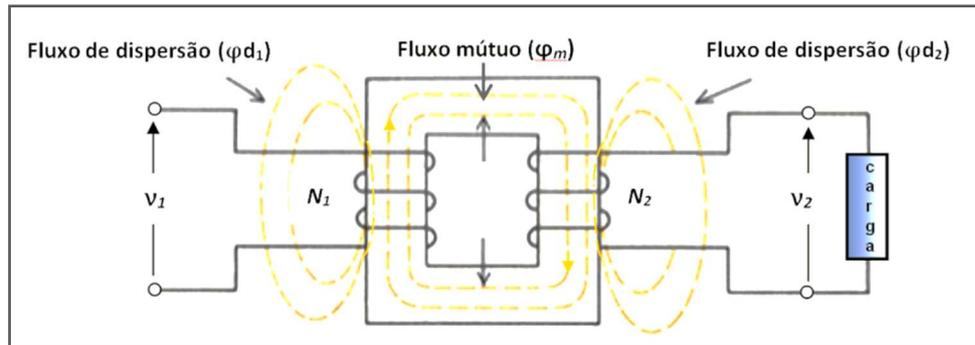


Figura 3-10 – Fluxo de dispersão
Fonte: Próprio autor

De forma que o fluxo concatenado na bobina primária e secundária será dado, respectivamente por:

$$\varphi_1 = \varphi_m + \varphi_{d1} \quad (3.30)$$

$$\varphi_2 = \varphi_m + \varphi_{d2} \quad (3.31)$$

Assim como o fluxo no núcleo (φ_m), os fluxos de dispersão (φ_{d1} e φ_{d2}) poderão ser representados através das respectivas relutâncias e indutâncias de dispersão.

3.6 Corrente de Excitação

Em um transformador real quando energizado em vazio, aparecerá uma corrente no primário chamada de corrente de excitação (i_0), necessária para magnetização do núcleo, como também para suprir as perdas no ferro, ou seja, as perdas por histerese e por Foucault. Logo, a corrente de excitação é composta por duas parcelas: a corrente de magnetização (i_m) e a corrente que supre as perdas no ferro (i_{Fe}). De forma que temos:

$$i_0(t) = i_m(t) + i_{Fe}(t) \quad (3.32)$$

Quando é conectada uma carga no secundário do transformador, a corrente oriunda do primário será a soma da corrente de carga e a corrente de excitação.

3.7 Circuito equivalente de um transformador real

Conhecendo-se as principais perdas elétricas e magnéticas de um transformador, é possível definir um circuito equivalente, conforme mostrado na Figura 3-11, e a partir deste definir modelos matemáticos.

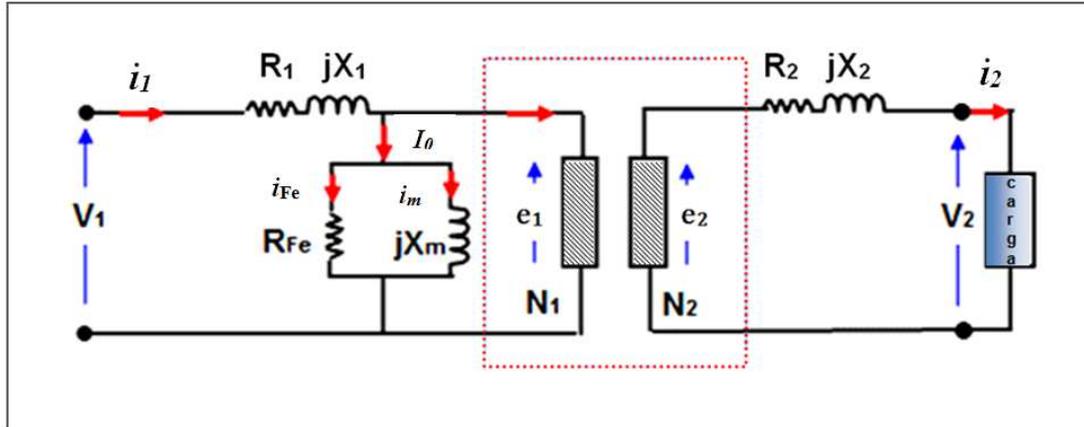


Figura 3-11 - Circuito equivalente de um transformador real

Fonte: Próprio autor

Onde:

R_1 e R_2 – resistências que representam as perdas no cobre do enrolamento primário e secundário, respectivamente;

X_1 e X_2 – representam a reatância de dispersão do enrolamento primário e secundário, respectivamente;

R_{Fe} – resistência representa as perdas no ferro;

X_m – reatância de magnetização que representa o feito devido à i_m necessária para estabelecer o fluxo magnético no núcleo do transformador.

3.8 Tipos de Transformadores

Os transformadores podem ser classificados quanto ao número de fases, número de enrolamentos e tipo de ligação.

3.8.1 Transformadores trifásicos

Quanto ao número de fases, os transformadores podem ser trifásicos ou monofásicos. No SIN são utilizados os trifásicos por conta dos valores elevados de potência requerida, tendo-se um largo uso tanto de transformadores como de autotransformadores. Do ponto de vista construtivo, podem ser compostos de três unidades monofásicas, conforme Figura 3-12, ou por uma unidade trifásica, conforme Figura 3-13.

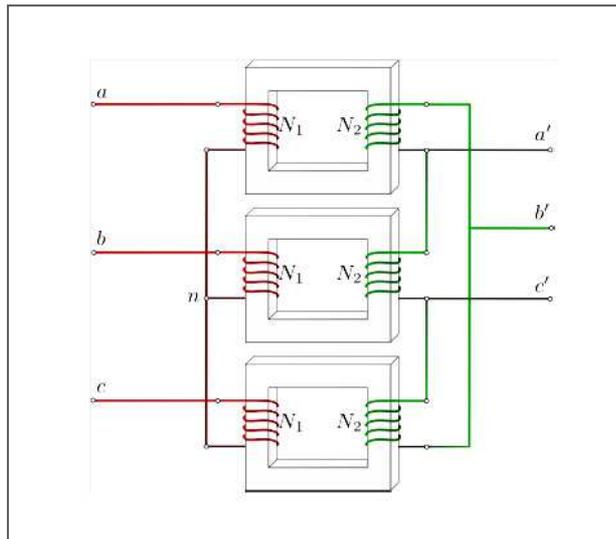


Figura 3-12 – Transformador Trifásico composto por três unidades monofásicas
 Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/trafo3.pdf>

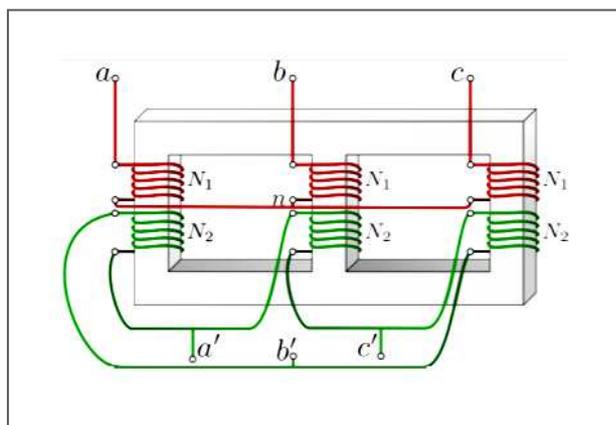


Figura 3-13 - Transformador Trifásico composto por uma unidade trifásica
 Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/trafo3.pdf>

O transformador trifásico formado por três unidades monofásicas traz vantagens quanto ao aspecto de manutenção e na substituição, pois geralmente durante sinistros apenas uma das unidades é danificada. Geralmente esse tipo de transformador tem uma unidade monofásica reserva, instalada no pátio da subestação, próximo as outras fases a fim de facilitar a substituição de uma possível unidade avariada. As unidades trifásicas, no entanto, não trazem essa flexibilidade, mas são mais baratas, mais compactas e mais eficientes uma vez que a quantidade de ferro e cobre são menores diminuindo as perdas.

Os autotransformadores se diferenciam dos transformadores por esse possuir uma conexão elétrica, “ponto comum”, entre seus enrolamentos primários e secundários, conforme mostrado na Figura 3-14.

Observa-se que os terminais de alta tensão compreendem os dois enrolamentos que são ligados em série através do ponto comum e os terminais dos enrolamentos de menor tensão é uma derivação deste.

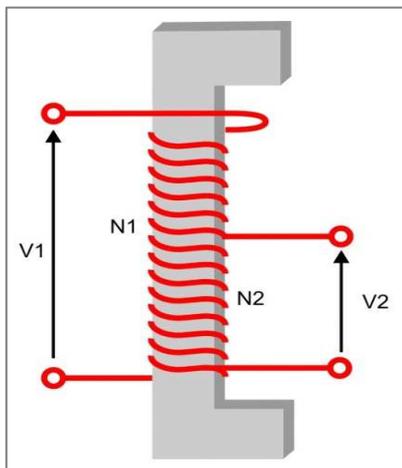


Figura 3-14 – Autotransformador trifásico

Fonte: Próprio autor

3.8.2 Número de Enrolamentos

Quanto ao número de enrolamentos, os transformadores presentes no SIN podem ser de dois ou três enrolamentos.

3.8.3 Tipos de ligação

Um transformador trifásico é constituído de pelo menos três enrolamentos no primário e três enrolamentos no secundário, os quais podem ser conectados em Estrela (Y) ou Delta (Δ), tendo a possibilidade de quatro tipos de ligação.

Em transformadores trifásicos, a relação de transformação é definida pela relação entre a tensão de linha do primário e a tensão de linha do secundário. Portanto, dependendo da ligação, a relação de transformação pode ser diferente da relação de espiras. A seguir são mostradas as conexões mais usais em transformadores empregados no SIN.

a) Conexão Y-Y

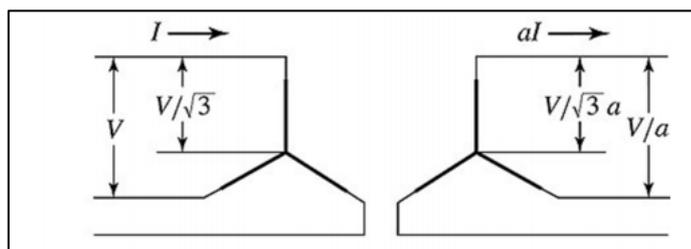


Figura 3-15 – Ligação Y-Y

Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/trafo3.pdf>

Geralmente é a conexão utilizada em autotransformadores e como a tensão sobre o enrolamento é $V/\sqrt{3}$, ou seja, 57,7% da tensão de linha, o número de espiras de cada enrolamento é menor do que na ligação em delta. Traz ainda a vantagem de fornecer dois níveis de tensão: fase-neutro e fase-fase.

b) Conexão Δ - Y ou Y - Δ

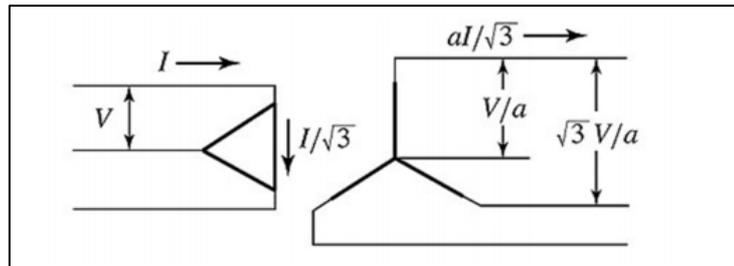


Figura 3-16 – Ligação Δ - Y

Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/trafo3.pdf>

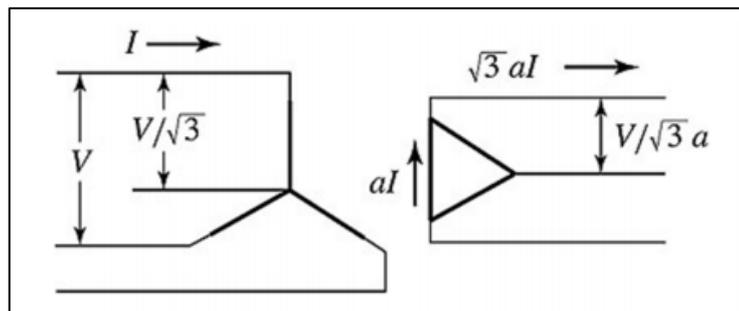


Figura 3-17 – Ligação Δ - Y

Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/trafo3.pdf>

As ligações em Δ -Y são geralmente empregadas em transformadores elevadores em subestações de geração e Y- Δ em transformadores abaixadores. Tem a vantagem do lado de alta tensão poder ser aterrado e o lado em delta funciona como um filtro de harmônicos, como também permite circulação da corrente $3I_0$ que aparece no sistema durante surtos desequilibrados. Esse caminho para corrente $3I_0$ diminui as sobretensões durante os surtos. Nos transformadores com ligação Y –Y geralmente são providos de um terceiro enrolamento em delta com essa finalidade.

3.9 Curva de Magnetização

A curva de magnetização ou curva de saturação é de fundamental importância quando se faz necessário conhecer o comportamento não linear dos transformadores quando submetidos a surtos no sistema.

Cada projeto traz características magnéticas particulares, de forma a se ter curvas de saturação diferentes entre transformadores de mesma potência, número de enrolamentos e níveis de tensão.

Uma curva de magnetização típica é mostrada na Figura 3-18. Esta curva relaciona a tensão terminal com a corrente de excitação, podendo ser dividida em três regiões distintas[24]:

- a) Região linear: região de permeabilidade magnética constante;
- b) Joelho;
- c) Região não linear: saturação.

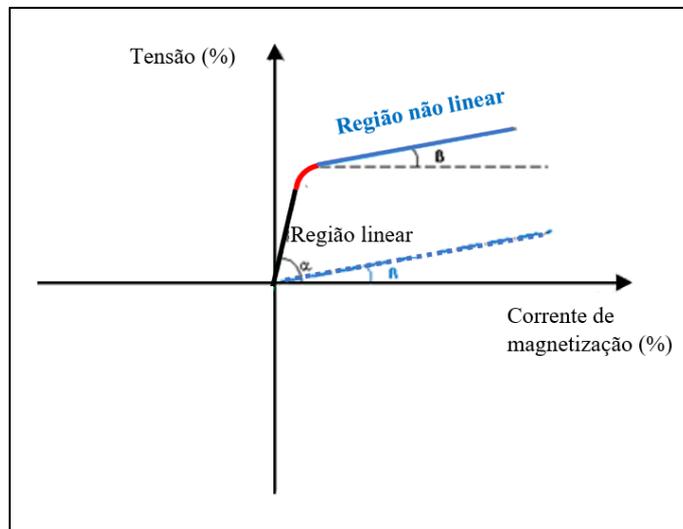


Figura 3-18 – Curva de Magnetização Típica

Fonte: Próprio autor

A região linear é aquela onde a corrente de excitação do núcleo varia linearmente com o aumento da tensão nos terminais do transformador, uma vez que nessa região a permeabilidade magnética se mantém constante e a reatância de magnetização é definida apenas por *tangente* (α).

O joelho da curva define a entrada na região não linear, ou seja, se dá quando o núcleo começa a saturar e os domínios magnéticos começam a se alinhar. Quando do alinhamento completo, o núcleo chega à saturação, dando início a região não linear. Nessa região pequenas variações na tensão levam a grandes variações de corrente. Devido à saturação, as linhas de fluxo fecham externamente ao núcleo e nesta região teremos uma reatância definida pela tangente (β), a qual é conhecida como reatância de núcleo de ar (X_{ac}).

Os fabricantes têm dificuldades de medir os parâmetros que definem a região não linear em laboratório quando se trata de transformadores de grande porte, uma vez que seriam necessários elevados níveis de tensão para se entrar nessa região. Sem falar que essas resultariam em saturação dos próprios equipamentos de medição, causando deste modo imprecisão nos valores medidos. Para contornar este problema, os fabricantes definem os pontos da curva a partir do joelho através de aplicação de tensão com as bobinas não conectadas ao núcleo ferromagnético do transformador, ou seja, estando em um núcleo de ar. Esta medição fornecerá os valores correspondentes na Figura 3.18 à reta azul de inclinação.

Segundo [26], quando o X_{ac} é calculado, utiliza-se formulação matemática para cálculo de bobinas com núcleo de ar, já que nessa região o núcleo encontra-se saturado. Existem vários métodos para a determinação da reatância de bobinas com núcleo de ar, Dentre os vários métodos utilizados para determinar o X_{ac} (Maxwell, Havelock, Nagaoka, Rayleigh, Hark, entre outros), alguns fabricantes utilizam o método de Hark, por se tratar de um método relativamente simples, além de produzir resultados bem aproximados.

3.10 Corrente de Inrush

A corrente transitória de magnetização que aparece durante a energização do transformador é conhecida como Corrente de Inrush. Esta é uma consequência da saturação do núcleo do transformador devido à variação abrupta na tensão sob seus enrolamentos [21]. Muito embora as maiores correntes de inrush observadas em transformadores sejam resultado de sua energização, elas também podem ser causadas pelo restabelecimento da tensão no ponto de conexão do transformador, após a eliminação de uma falta externa a esse, como retratado por [22].

Os níveis das correntes de magnetização no momento da energização de transformadores de potência podem chegar a valores de pico acima de 7 vezes a corrente nominal do transformador, a qual pode originar solicitações severas no transformador sob manobra e nos demais equipamentos do sistema, como:

- Elevados esforços mecânicos;
- Afundamento temporário de tensão;
- Sobretenção devido a ressonâncias;
- Atuação indesejada de proteções.

Desta forma, são necessárias simulações computacionais de transitórios eletromagnéticos para verificar os níveis máximos de correntes de inrush que um determinado transformador poderá atingir durante sua energização, para que a proteção diferencial seja ajustada corretamente, evitando desligamentos indesejados, uma vez que essas altas correntes de inrush podem ser entendidas como sendo uma falta interna no transformador e provocar o disparo indesejado dos respectivos relés diferenciais, bem como verificar o impacto das sobretensões e sobrecorrentes transitórias causadas por esse tipo de manobra, tanto no transformador energizado, quanto nos demais equipamentos do sistema, a fim de tomar medidas mitigadoras, quando essas grandezas superarem seus limites de suportabilidade.

Na Figura 3-19 é mostrada a forma de onda da corrente de inrush em um transformador de 100MVA, originada pela sua energização.

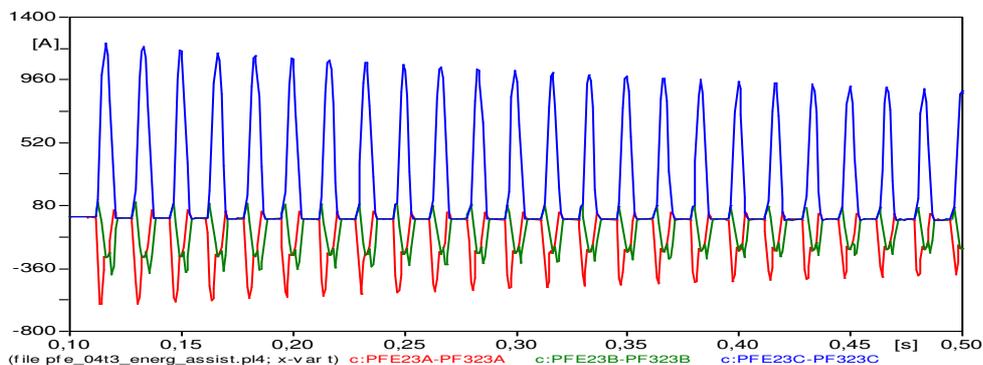


Figura 3-19 – Corrente de “inrush” durante a energização de um transformador de potência

Fonte: Próprio autor

A corrente de inrush tem as seguintes características:

- a) Tem um crescimento abrupto, atingindo o seu pico máximo no primeiro meio ciclo, após o instante de energização do transformador, e decai até que o transformador atinja a sua condição normal de magnetização;
- b) É uma forma de onda não senoidal devido à presença de componentes de alta frequência, principalmente de 2º harmônico, originadas pela saturação do núcleo do transformador. Essas componentes harmônicas aumentam proporcionalmente a saturação do núcleo.
- c) A componente fundamental da corrente de magnetização é atrasada 90° da tensão aplicada no primário (e_1).

- d) Geralmente contém uma componente DC, que tem um constante de tempo muito maior que o decaimento exponencial da componente DC de uma corrente de curto-circuito;

Da teoria clássica, sabe-se que a magnitude e a duração da corrente de *inrush* dependem basicamente de:

- Do ponto da forma de onda de tensão no instante em que o transformador é energizado;
- Do valor e polaridade do fluxo residual no núcleo do transformador em relação ao fluxo de regime permanente no momento da energização;
- Do nível de saturação ou densidade de fluxo máximo do material ferromagnético do núcleo do transformador;
- Da impedância total do circuito em que a corrente de *inrush* flui;
- Do nível de curto-circuito do ponto de conexão do transformador.

No caso de haver um ou mais transformadores já conectados ao sistema, a duração e a magnitude da corrente de *inrush* pode mudar significativamente, devido à saturação dos transformadores já conectados à rede. Este fenômeno, denominado de “interação simpática” [23] é provocado pela assimetria na tensão imposta aos transformadores em operação, que é causada pela componente CC da corrente de *inrush*.

Conforme abordado em [24], quando o transformador é desenergizado, a tensão de excitação é removida e a corrente de magnetização (i_m) é zerada. O fluxo, seguindo o laço de histerese, conforme apresentado sessão 3.5.3, tende a cair para um valor φ_r , de acordo com a Figura 3-20. Sendo o transformador energizado no ponto da forma de onda da tensão que gere um fluxo que corresponda à densidade do fluxo residual, praticamente não haverá corrente de *inrush*. Na prática, isso só é conseguido através de chaveamento controlado [15].

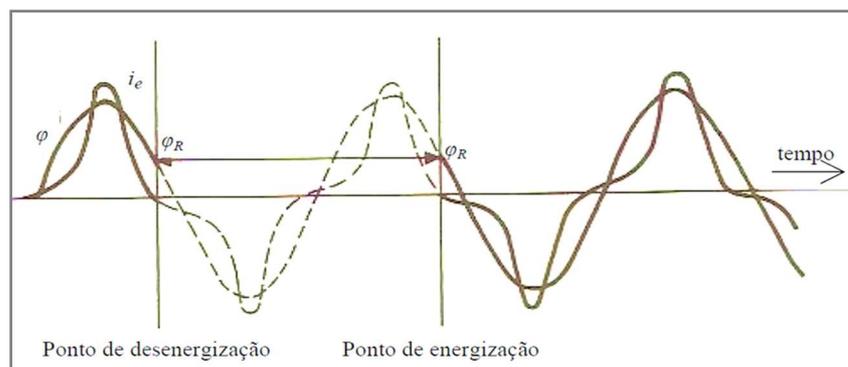


Figura 3-20 –fluxo versus corrente de magnetização durante a reenergização do transformador [24]

Quando o chaveamento não é controlado, ou seja, quando o disjuntor é fechado em ponto aleatório da forma de onda da tensão, haverá transitório e o consequente aparecimento das correntes de inrush elevadas. O que pode resultar em elevados fluxos dinâmicos no núcleo do transformador, responsáveis pela saturação de uma ou mais colunas do núcleo e, como consequência, elevados valores da corrente de magnetização podem surgir.

Essa situação é ilustrada na Figura 3-21 onde é representada uma energização no instante que o fluxo assumiria seu máximo negativo, estando nesse instante um fluxo residual positivo. Neste caso, no instante da energização o fluxo magnético no núcleo do transformador crescerá a partir do fluxo residual pré-existente, gerando um fluxo máximo elevado e consequente um alto valor de corrente de magnetização, que seria a corrente de inrush.

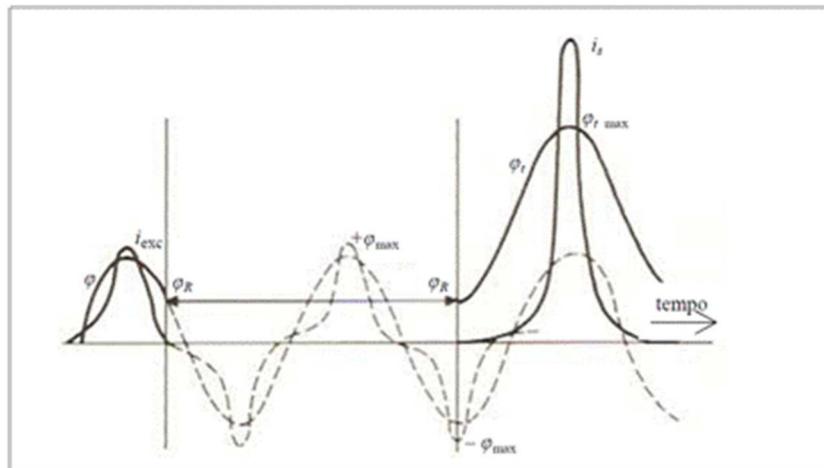


Figura 3-21 – Fluxo versus corrente de magnetização durante a reenergização do transformador [24].

Como no sistema trifásico, os fluxos magnéticos são defasados de 120° entre si, o fluxo residual de uma fase será positivo e nas outras duas serão negativos ou vice-versa. De forma que o fluxo residual será adicionado ou subtraído do fluxo gerado no núcleo devido à energização, o que levará a um aumento ou diminuição da corrente de inrush de cada fase.

A partir destas constatações pode-se verificar que a corrente de inrush, na maioria das vezes, atinge a região de saturação de transformadores de potência, em pelo menos uma das fases. Desta forma, é possível pensar que ao se medir tal corrente e associá-la ao fluxo magnético correspondente, pode-se traçar a curva de saturação de um transformador até sua região de alta saturação, a qual equivale ao maior valor dessa corrente. Sendo essa a base teórica utilizada para o desenvolvimento da metodologia para levantamento da curva de saturação proposta nessa dissertação, conforme será apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos utilizados no desenvolvimento da metodologia proposta nessa dissertação, as etapas de desenvolvimento e a descrição de todas as adequações que foram necessárias para aplicação da metodologia..

4. Metodologia Proposta

Frente aos métodos de medições e/ou estimação da curva de magnetização de grandes transformadores de potência, verifica-se que o método baseado na medição das formas de onda de tensão e da corrente de inrush nos enrolamentos do transformador, alia precisão na medição com praticidade, uma vez que não é necessária utilização de fontes para aplicação de sinais elétricos, deslocamento dos transformadores para laboratórios, nem o conhecimento prévio das dimensões do ferro e dos enrolamentos. A aplicação da metodologia escolhida, independente do seu nível de tensão, potência, características construtivas e tipo de ligação.

4.1 Levantamento da Curva de Saturação a partir da corrente de Inrush

O comportamento eletromagnético de um transformador depende diretamente da modelagem precisa de sua curva de saturação, cujos principais parâmetros de interesse são: o joelho e a reatância de núcleo de ar (X_{ac}). Para obter essa curva foi desenvolvido um método baseado na medição da corrente de inrush desse equipamento. O método consiste basicamente em medir a corrente de inrush de um transformador durante manobras de energização e calcular a integral da tensão medida, do instante de energização (T_0) até o primeiro pico de corrente (T_1), a fim de obter o fluxo magnético correspondente, conforme é mostrado na Figura 4-1.

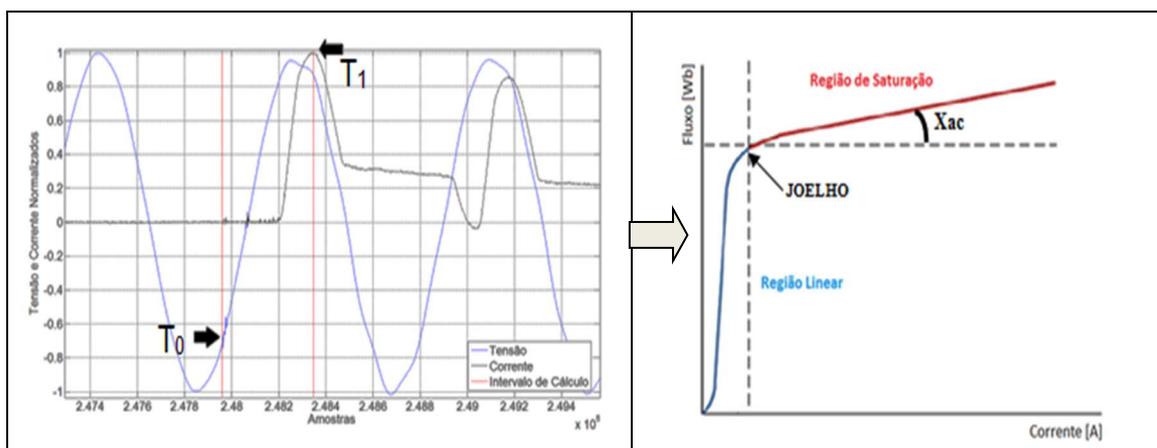


Figura 4-1 – Composição da curva de saturação a partir da corrente de inrush

Fonte: Próprio autor

Este método permite alcançar as regiões de mais elevados níveis de saturação do transformador, uma vez que a corrente durante a energização de um transformador pode ser mais de 5 vezes a corrente nominal. Contudo, essa metodologia traz consigo os seguintes desafios:

- a) Registrar uma corrente de magnetização que atinja a região de saturação;
- b) Necessidade de identificação do exato instante de chaveamento, quando o transformador é desenergizado (T_0') e quando é reenergizado (T_0);
- c) A necessidade do conhecimento prévio do fluxo residual;
- d) Correção da corrente de inrush nos transformadores com ligação estrela-delta.

Todas essas dificuldades foram vencidas ao longo do desenvolvimento dessa dissertação, conforme apresentado a seguir.

4.2 Medição da Corrente de Inrush e do Fluxo Magnético

Como pode ser observada pela Figura 3-19, a máxima corrente de energização de um transformador é alcançada somente no pico (positivo ou negativo) do primeiro ciclo da referida corrente. Assim, para fins de medição da curva de saturação, deve-se empregar somente o primeiro quarto de ciclo da forma de onda da corrente de energização, como mostrado na Figura 4.1.

Portanto, na medição do fluxo magnético, a de se considerar, segundo [27], que ao se aplicar uma tensão senoidal ao enrolamento primário do transformador e estando o secundário em aberto, ou seja, com o transformador em vazio, tem-se:

$$v_1 = r_1 i_0 + l_1 \frac{di_0}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1)$$

Onde:

$r_1 i_1$ = é a queda de tensão no enrolamento primário;

$l_1 \cdot di_0/dt$ = é a queda de tensão devido ao fluxo de dispersão do enrolamento primário;

$N_1 \cdot d\phi/dt$ = é a força contra-eletromotriz induzida no primário.

Sendo que os dois primeiros termos da equação 4.1 podem ser desprezados, se admitir que no momento da energização a tensão da fonte é um valor $v_1 = V_{1m} \text{sen}(\omega t + \alpha)$, onde α é qualquer ângulo em $t = 0$. Assim, a equação anterior é reduzida para:

$$v_1 = V_{1m} \text{sen}(\omega t + \alpha) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.2)$$

Cuja integral é:

$$\phi = \phi_0 + \phi_m \cos \alpha - \phi_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (4.3)$$

Onde:

ϕ_0 = o fluxo residual no instante $t = 0$;

$$\phi_m = V_{1m} / N_1 \omega .$$

Assim, para obtenção do fluxo magnético da curva de saturação de um dado transformador, para o caso em que $\phi_0 = 0$, basta-se-á medir a tensão de energização aplicada aos terminais do transformador no instante exato de sua energização e integrar seu valor de $t = 0$ até $t = 4,1667$ ms (1/4 de ciclo em 60Hz) para se obter os valores de ϕ , e, conseqüentemente, traçar a curva de saturação do transformador.

4.3 Identificação dos Instantes de Chaveamento.

A identificação dos instantes de energização (T_0) de cada uma das fases do transformador é fundamental para o levantamento do fluxo magnético que irá compor a curva de saturação.

Uma possibilidade para auxiliar essa identificação seria utilizar a informação do relé digital que controla o disjuntor. No entanto, por se tratar de um dispositivo mecânico, o disjuntor só promove a abertura ou fechamento do circuito alguns ciclos depois do comando do relé, como mostra a figura a seguir. Vale ressaltar que a diferença de tempo entre o comando de abertura e a abertura efetiva varia de disjuntor para disjuntor. Isso inviabiliza a utilização dessa informação para auxiliar a detecção necessária.

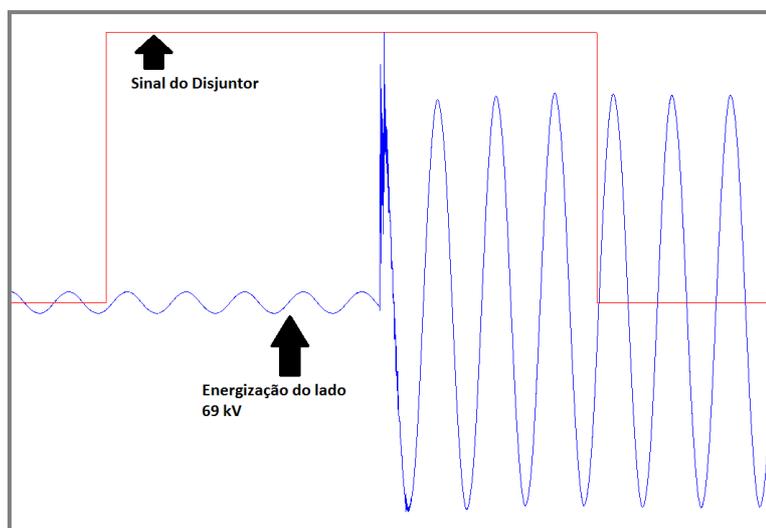


Figura 4-2 - Limitação do Sinal de Abertura do Disjuntor

Fonte: Próprio autor

Outra dificuldade é a visualização desse instante na forma de onda da tensão a partir do transitório provocado pela energização do transformador em questão, devido à disposição dos transformadores de potencial (TP) na subestação.

No caso da Chesf, há subestações que dispõem de TP nas conexões de transformador (CT), ficando fácil a visualização da energização de cada uma das fases (ver arranjo do tipo 1 - Figura 4-3). Já em outras, a medição da tensão de energização é feita pelo TP de barra e, neste caso, fica difícil a identificação do instante de energização na forma de onda registrada (ver arranjo do tipo 2 - Figura 4-3). Para esses casos o processo de detecção da energização envolve a identificação do transitório de chaveamento na forma de onda tensão.

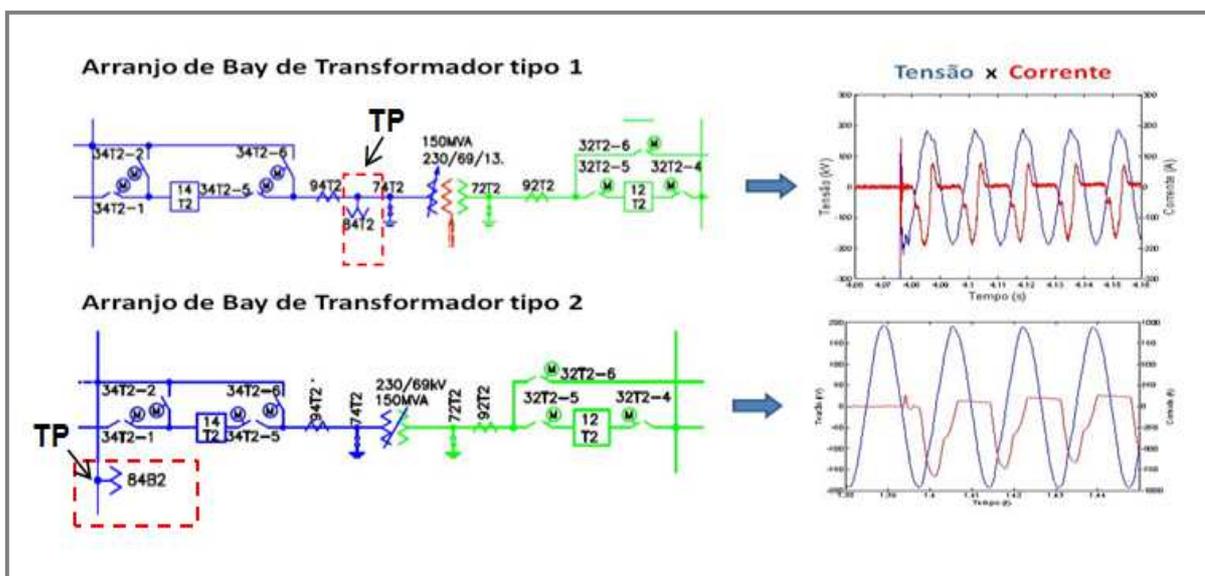


Figura 4-3 - Detecção do instante de chaveamento de acordo com a topologia da subestação.

Fonte: Próprio autor

Nesse cenário, uma segunda alternativa possível seria utilizar o transitório associado com a manobra, que ocorre alguns milissegundos antes do pico da corrente de inrush.

Neste sentido, o processo de detectar a energização e desenergização envolve a identificação do instante em que ocorrem os transitórios de manobra na forma de onda de tensão. A Figura 4-4, mostra o resultado do processo de identificação da energização de forma automática para uma forma de onda real, utilizando esse transitório como referência. Nessa figura também está assinalado o intervalo de cálculo da curva de saturação para a energização, determinado também de forma automática. Esse intervalo é composto pelo instante de energização e valor de pico da corrente de inrush.

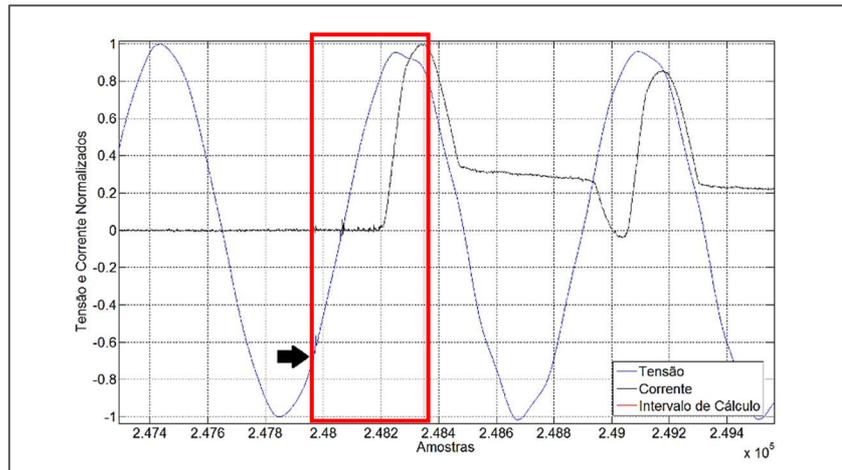


Figura 4-4 - Detecção do instante de chaveamento a partir do transitório da onda de tensão.

Fonte: Próprio autor

Existem diversos métodos para realizar os estágios de disparo e segmentação de oscilografias, os quais normalmente são tratados de maneira conjunta. De forma geral, os métodos são agrupados de acordo com a natureza do método aplicado aos sinais. Os principais grupos compreendem:

- Detecção de variações através da análise do sinal no domínio do tempo;
- Métodos de filtragem;
- Transformações tempo-frequência, como por exemplo Transformada Janelada de Fourier e Transformada Wavelet;
- Resíduos mais proeminentes de modelos baseados em estimação espectral;
- Técnicas de reconhecimento de padrões.

Uma característica comum a esses métodos é que todos realizam a estimação das características do sinal (espectro) e através do resíduo calculado amostra a amostra, é possível se estabelecer a detecção dos transitórios, uma vez que se esperam resíduos de mais alta magnitude em pontos aonde existem transições súbitas, já que o erro de estimação é maior nesses casos.

Dentre os diversos métodos existentes, os mais utilizados são os baseados em Filtro de Kalman o qual foi o método usado nesse trabalho.

4.3.1 Utilização do Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um tipo especial de filtro, cuja principal característica é a estimação recursiva ótima dos estados e parâmetros de um modelo. O filtro de Kalman realiza essa estimação através de um processo de predição-correção no qual são representadas as relações entre as medidas e os estados, bem como as relações entre os estados atuais e anteriores. Para tanto, faz-se necessária a representação do modelo em equações de estado.

A partir dos resíduos estimados a cada amostra, pode-se empregar uma metodologia de comparação com o limiar automaticamente calculado e suavização. Para exemplificar, na Figura a seguir está representado o valor normalizado do resíduo calculado para uma fase de um evento relacionado com um afundamento de tensão. Observa-se que nos instantes em que ocorre a transição entre o estado pré-falta e o estado em falta, os resíduos apresentam elevada magnitude. Com isso, têm-se os instantes de tempo em que ocorrem as variações nos sinais (disparo), fazendo com que seja possível a segmentação dos eventos do sinal.

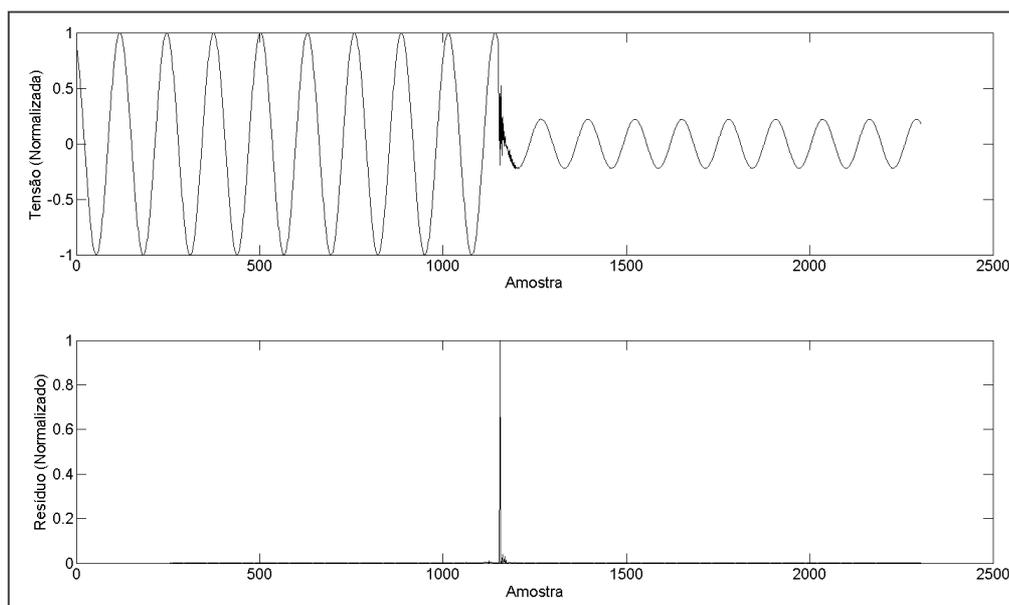


Figura 4-5 – Cálculo dos Resíduos do Filtro de Kalman

Fonte: Próprio autor

Para realizar a segmentação é necessária a aplicação de um limiar de comparação que forneça a separação entre trechos em regime transitório ou em regime permanente. No exemplo da Figura 4-4, poder-se-ia determinar um limiar no valor de 0,01 para realizar a segmentação. Com isso, instantes de tempo cujo valor do resíduo é superior ao valor do limiar poderiam ser considerados como transições entre estados (recebendo valor 1, por exemplo) e, os instantes de tempo com o resíduo inferior ao limiar, seriam caracterizados por estados

quase-estacionários, ou mesmo, o sinal em regime permanente (recebendo valor -1, por exemplo). Essa operação está representada na Figura 4-6.

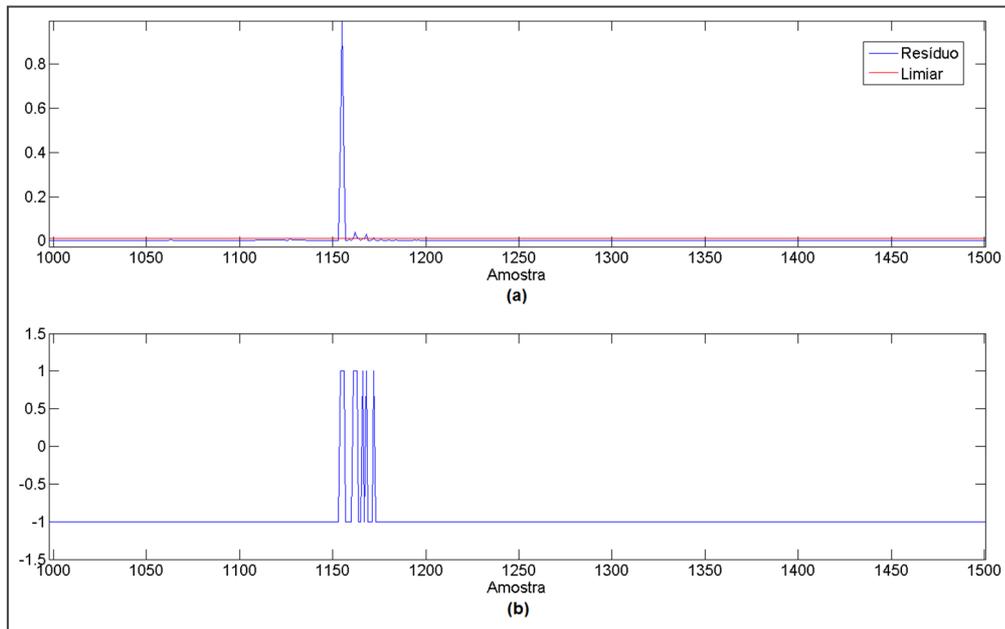


Figura 4-6 – Processo de definição de limiar.

Fonte: Próprio autor

Uma possível forma de se estabelecer o cálculo automático do limiar baseia-se no conceito de um limiar universal, cujo cálculo é fundamentado no desvio médio absoluto do sinal. Sua proposição inicial era voltada para redução de ruído de um sinal no domínio Wavelet. Porém, sua aplicação pode ser bastante útil para determinação automática de limiares em resíduos de modelos de estimação espectral, sendo, portanto, a forma escolhida para determinação automática do limiar para o presente trabalho.

Existem instantes de tempo cujo valor do resíduo calculado é inferior ao valor limiar, embora esses instantes pertençam ao transitório de mudança de estado. Esse fenômeno faz com que seja necessário mais um estágio para a segmentação do sinal sob análise, de forma a suavizar a resposta do método de detecção. Basicamente, deve-se considerar que os picos muito próximos devem ser agrupados, de forma que os instantes de tempo que possuem o resíduo inferior ao limiar, mas estão próximos de instantes de tempo cujo resíduo é superior ao limiar, devem ser agrupados e considerados como parte do transitório do sinal. Um exemplo dessa metodologia, utilizando os resíduos calculados, a “limiarização” automática e a suavização, a partir de uma estimação realizada com Filtro de Kalman, está apresentado na Figura 4-7.

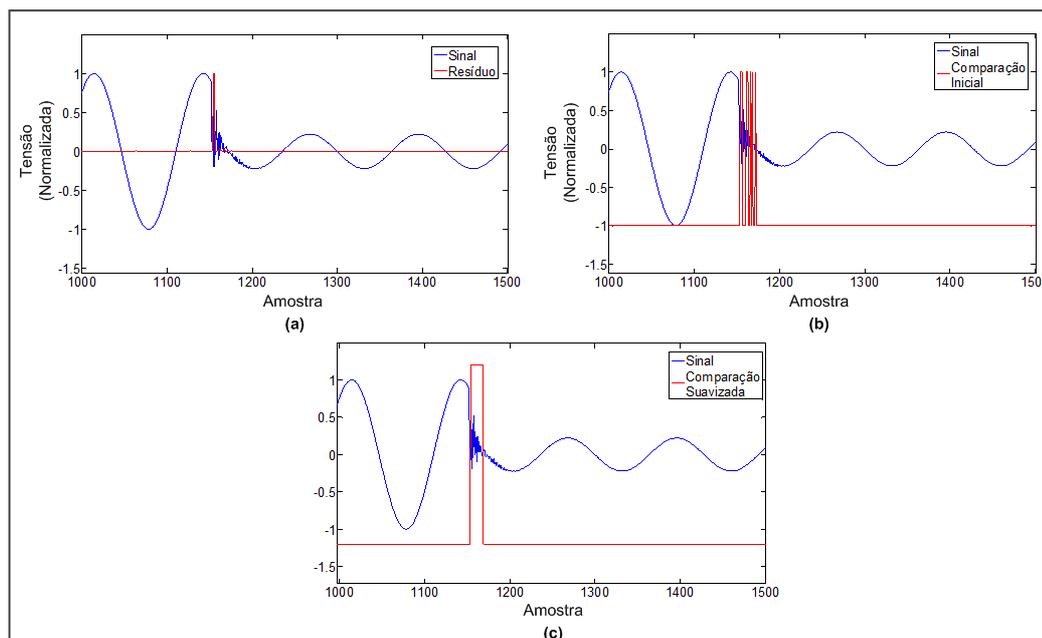


Figura 4-7 - Exemplo completo da utilização do Filtro de Kalman para Detecção de Transitórios.

Fonte: Próprio autor

Para esse trabalho, apenas o instante inicial da “Comparação Suavizada” apresentada na Figura 4-7 será utilizada, uma vez que é necessária apenas a informação do instante de energização ou desenergização do transformador. Além disso, será possível realizar esse processo de definição dos instantes manualmente (visualmente), nos casos em que o processo de detecção automática apresentar diferenças em relação aos instantes reais.

A grande dificuldade dessa metodologia como um todo, é que a visualização dos transitórios de energização e desenergização podem ser imperceptíveis em função do esquema de medição do TP da barra que alimenta o transformador. Esse TP é instalado à montante da chave de manobra. Com isso, a identificação exata do instante de energização é mais complicada, pois do ponto de vista de monitoramento, sempre haverá uma tensão sendo indicada pelo TP da barra, conforme exemplifica a Figura 4-4. É possível observar nessa Figura, que o transitório associado com o fechamento da chave é pouco proeminente na forma de onda. Ainda assim, o método de detecção com base no filtro de Kalman foi capaz de identificar as alterações da forma de onda e assinalar o instante de forma correta.

Com isso, mesmo efetuando-se o monitoramento antes da chave, é possível extrair dos transitórios de manobra, os instantes necessários para o cálculo da curva de saturação. O mesmo vale para os instantes de cálculo do fluxo residual.

Esse mesmo procedimento foi repetido para outras energizações reais disponibilizadas pela Chesf.

Os resultados para o intervalo de cálculo determinado de forma automática estão apresentados nas Figura 4-8, Figura 4-9 e Figura 4-10.

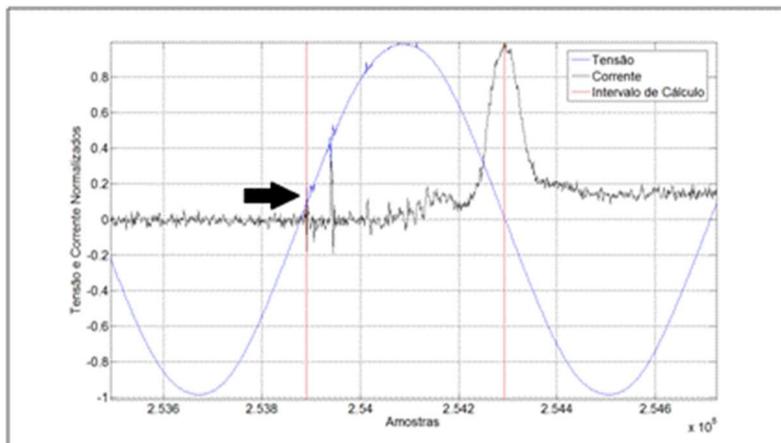


Figura 4-8 – Desempenho do Método de Detecção Automática (Caso 2)
Fonte: Próprio autor

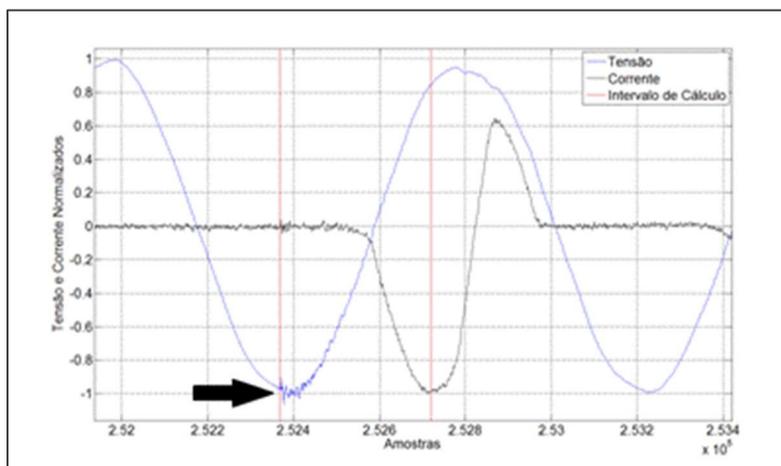


Figura 4-9 – Desempenho do Método de Detecção Automática (Caso 3)
Fonte: Próprio autor

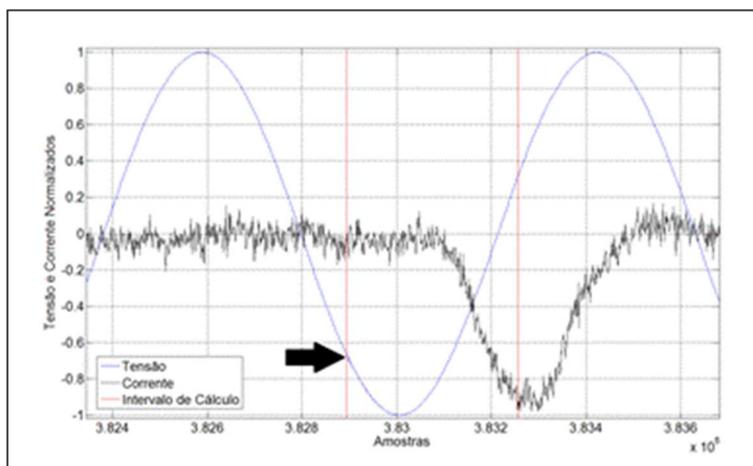


Figura 4-10 – Desempenho do Método de Detecção Automática (Caso 4)
Fonte: Próprio autor

Analisando o desempenho de detecção, observa-se que mesmo transitórios de manobra quase imperceptíveis (Figura anterior), podem ser identificados pelo método de detecção com base no filtro de Kalman.

O principal inconveniente dessa abordagem é que frequências de amostragem inferiores à 40kHz, podem levar a resultados inconsistentes. Isso é função dos transitórios de manobra apresentar o conteúdo de frequência mais proeminente para uma faixa acima de 20 kHz. A Figura 4-11 demonstra uma forma de onda com frequência de amostragem de 12 kHz. Observa-se que não é possível identificar visualmente transitórios na forma de onda de tensão ou corrente. O mesmo ocorre quando é aplicado o filtro de Kalman nessas formas de onda.

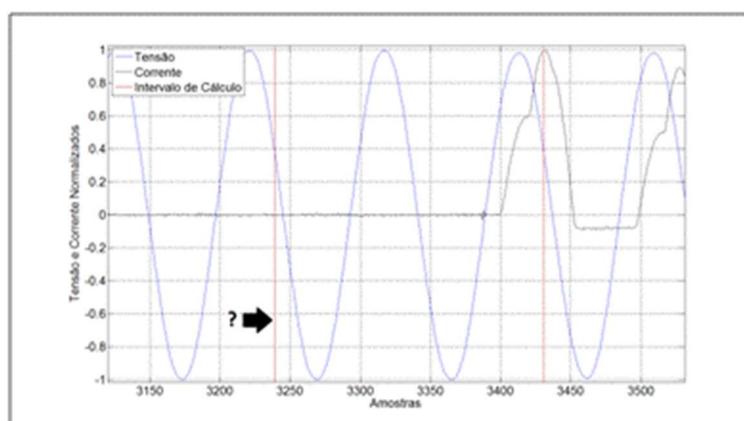


Figura 4-11 – Desempenho do Método de Detecção Automática (Caso 5)

Fonte: Próprio autor

Nesse sentido, recomenda-se a utilização de uma frequência de amostragem de 50 kHz para o dispositivo de medição, maximizando a probabilidade de detecção correta do intervalo de cálculo.

4.4 Obtenção do fluxo residual (ϕ_0)

Para aplicação da metodologia de medição da curva de saturação de transformadores de potência, o valor do fluxo residual deve ser conhecido. Se as formas de onda utilizadas na medição da curva de saturação começar no instante da energização, os fluxos iniciais são essencialmente os fluxos residuais presentes nas pernas do transformador. Vários métodos têm sido propostos na literatura para estimar ou controlar o fluxo residual nas colunas do transformador. A técnica utilizada como base no desenvolvimento dessa dissertação para se calcular o fluxo residual, está proposta em [15]. Tal técnica utiliza a medição da tensão de desenergização do transformador para o cálculo do fluxo residual. Contudo, foram feitas

algumas alterações matemáticas que além de não trazerem prejuízos na medição, facilitaram sua implantação computacional.

A Figura 4-12 mostra, na forma de diagrama de blocos, o procedimento utilizado para o cálculo do fluxo residual no núcleo de um transformador. Cada bloco, descrito abaixo, foi implementado computacionalmente.

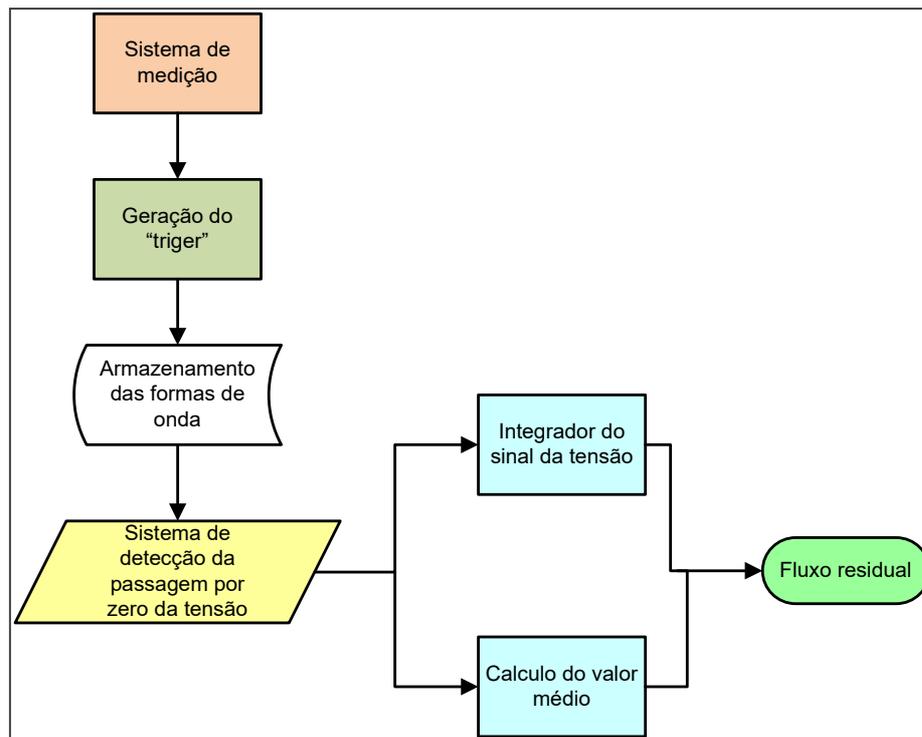


Figura 4-12 - Diagrama de blocos da proposta para definição do fluxo remanescente.

Fonte: Próprio autor

- Sistema de medição – O registro da forma de onda de tensão obtido de oscilografia.
- Geração do *trigger* – Algoritmo que irá detectar a desenergização do transformador e envia sinal para o sistema de armazenamento começar a gravar as formas de onda da tensão com pelo menos dois ciclos antecedentes ao momento de desenergização e dois ciclos após a desenergização completa do transformador;
- Armazenamento da forma de onda – Memória temporária onde serão gravadaa as formas de onda pertinentes à medição do fluxo residual;
- Sistema de detecção da passagem por zero da tensão – algoritmo que irá detectar o momento exato da passagem por zero da forma de onda da tensão e define o início do cálculo do fluxo magnético (integral da tensão);

- Integrador do sinal da tensão - Bloco responsável pela integração da tensão nos terminais do transformador durante o procedimento de cálculo do fluxo remanescente;
- Cálculo do valor Médio - Bloco responsável pelo cálculo do valor médio de um ciclo da integral da tensão;
- Fluxo residual – Com a curva da integral da tensão e com o valor médio calculado para o 1º ciclo, realiza-se a normalização da curva do fluxo, e desta forma obtém-se o valor final do fluxo residual a ser utilizado no cálculo da curva de saturação do transformador.

Na prática, de posse do registro osciloscópio da tensão que se manteve nos enrolamentos do transformador no instante de desenergização, calcula-se a integral do referido sinal, a qual corresponderá ao fluxo magnético. Conforme esquema apresentado a seguir.

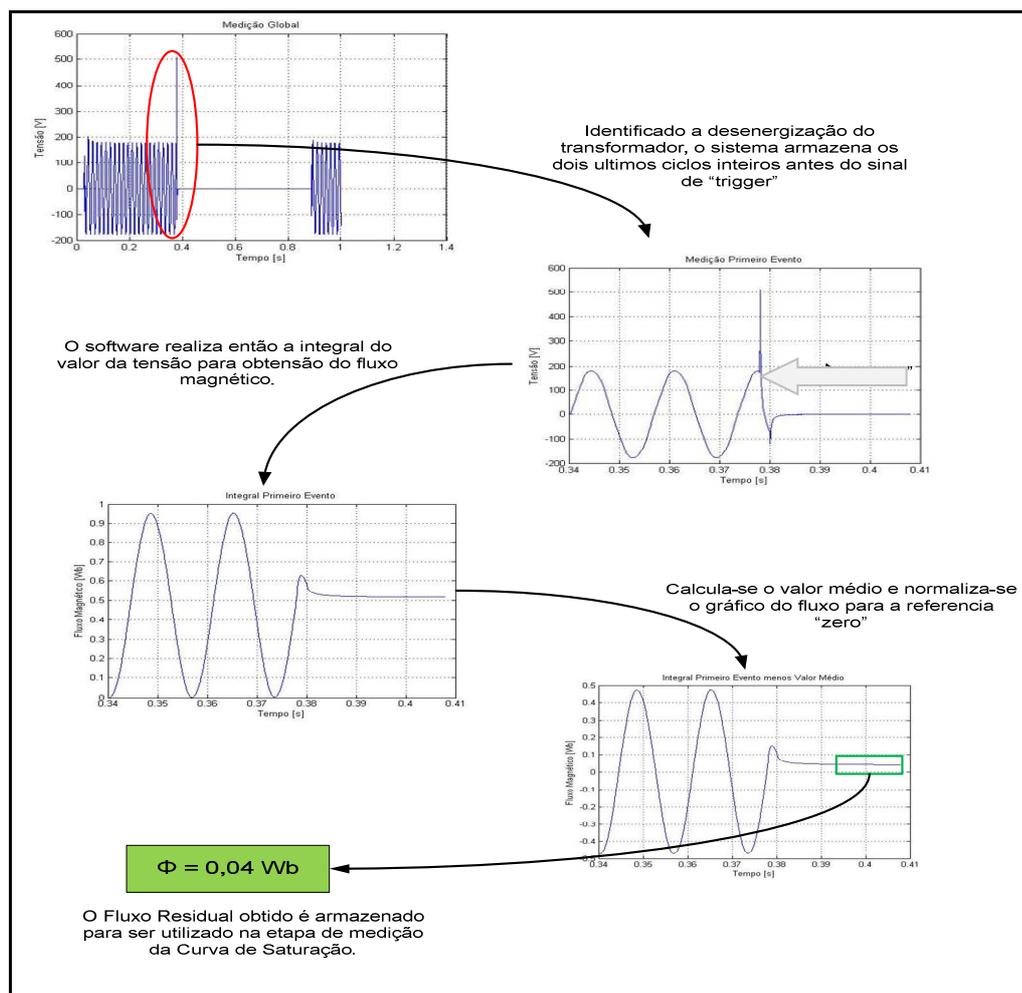


Figura 4-13 - Diagrama esquemático da proposta para definição do fluxo remanescente.

Fonte: Próprio autor

Referindo-se ao diagrama apresentado na

Figura 4-13, considere que o transformador esteja operando em regime permanente e sem carga. Num instante de tempo qualquer, em que o transformador for desligado, o algoritmo desenvolvido deverá gravar todos os pontos da forma de onda da tensão até dois ciclos antes à desenergização e o equivalente a dois ciclos após a desenergização, com estes dados armazenados, poder-se-á dar início ao procedimento de cálculo que culminará no valor procurado para o fluxo residual.

Muito embora a autorização de início do procedimento de cálculo tenha sido dada, o cálculo do fluxo somente é iniciado na primeira passagem da tensão pelo zero, com inclinação positiva da forma de onda. Vale lembrar que este procedimento poderia também utilizar a passagem por zero com inclinação negativa da forma de onda. O início de cálculo em um zero da tensão com derivada positiva ou negativa foi escolhido pelo fato de ser um procedimento mais fácil de implementar. Por outro lado, quando se utiliza amostragem de sinais, tensão ou corrente, poucas linhas de código de programa são necessárias para detectar o cruzamento por zero desses sinais.

O bloco de “Cálculo do valor médio” funciona apenas durante o período de um ciclo do sinal de tensão (janela de cálculo). O “Integrador do sinal da tensão”, disparado no mesmo instante que o “Cálculo do valor Médio”, funcionará continuamente até o final do procedimento de cálculo do fluxo remanescente.

Uma vez que o “Cálculo do valor médio” inicia a integração na passagem da tensão pelo valor zero, o fluxo calculado no intervalo de um ciclo alcançará um máximo cujo valor é o dobro do valor máximo do fluxo nominal e estará deslocado em relação ao eixo zero. Para anular este deslocamento se calcula o valor médio do fluxo determinado. A partir daí, o fluxo médio encontrado é adicionado ao fluxo calculado pelo “Integrador do sinal de tensão”, com seu sinal (positivo ou negativo) definido em função do sinal da derivada da tensão no momento em que o cálculo é iniciado, ou seja, caso o sinal da derivada da tensão seja positivo, o sinal será negativo e vice-versa.

Vale comentar que o fluxo residual não altera o formato da curva de saturação obtida no caso do fluxo residual ser zero, porém, a importância da definição do fluxo residual mantido no transformador antes da sua reenergização para medição da corrente de inrush e aplicação da metodologia, está relacionada à definição do joelho da curva de saturação. Pois o joelho define a tensão em o transformador entra na sua região não linear.

Entretanto, não é possível monitorar a desenergização do transformador, quando não há TP instalado em pelo menos uma das CT do transformador monitorado, uma vez que não é possível medir a tensão que fica sob os enrolamentos do transformador quando os disjuntores terminais são abertos para a desenergização do equipamento. Neste caso não há a possibilidade de se obter, pela metodologia proposta, o fluxo residual necessário ao correto cálculo da curva de saturação do transformador sob investigação.

Devido a esta dificuldade, um terceiro método foi utilizado no presente trabalho. Este método consiste em utilizar a região linear da curva de saturação e o joelho fornecidos pelo fabricante do transformador, uma vez que normalmente a região linear é levantada a partir de ensaios, apresentando resultados satisfatórios e para a região de saturação da curva é usada uma reta traçada a partir do fim da região linear da curva do fabricante (joelho) e estendida até o valor de máximo da corrente de inrush respeitando a inclinação da curva determinada pela metodologia proposta, ou seja, utilizando o X_{ac} definido a partir dos dados de medição, conforme apresentado na Figura a seguir.

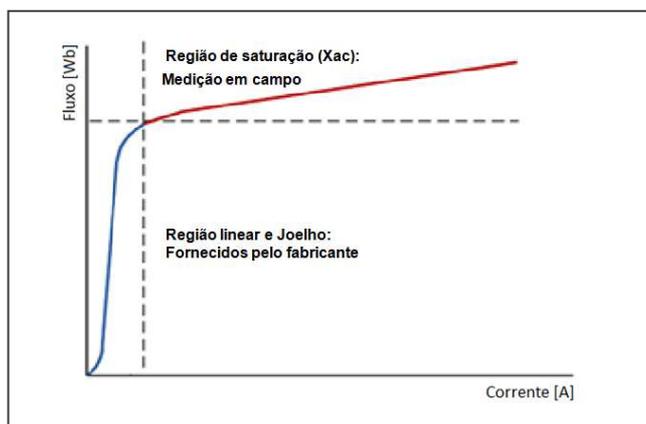


Figura 4-14 - Esquemático da curva de saturação utilizando a curva do fabricante

Fonte: Próprio autor

Este método será aplicado apenas nos casos em que não há TP em pelo menos uma das CT do transformador manobrado.

4.5 Correção da corrente de delta

No caso do transformador em questão possuir conexão estrela-delta são necessárias algumas considerações adicionais, pois o comportamento transitório destes transformadores durante o inrush é um pouco diferente de transformadores com conexão estrela-estrela. Vale ressaltar que a maioria dos transformadores de potência do sistema da Chesf possui conexão

estrela-delta, e desta forma o estudo do efeito da corrente de delta durante a energização se apresenta de suma importância para a confiabilidade dos resultados.

Durante condições de chaveamento, a tensão no transformador não é equilibrada devido à dispersão no tempo de chaveamento dos polos do disjuntor, e pela considerável queda de tensão na impedância do enrolamento primário. Desta forma, há circulação de uma corrente pelo enrolamento secundário ou terciário (conectado em delta) durante o período de energização. Esta corrente que circula no delta deve ser calculada e descontada do valor medido da corrente de inrush, encontrando-se a corrente real de magnetização. A determinação desta corrente de delta é realizada através da análise em malha fechada do secundário em delta do transformador. Este circuito é apresentado na Figura 4-15

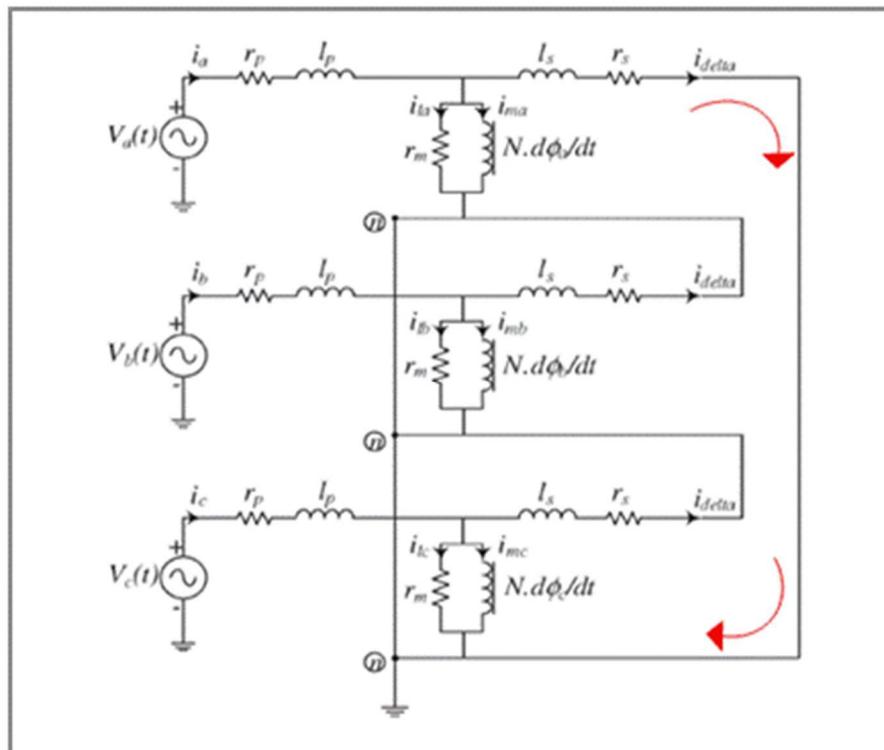


Figura 4-15 - Circuito de um transformador trifásico com um dos enrolamentos em delta.

Através da análise em malha fechada do enrolamento em delta do circuito da Figura 4-15, obtêm-se a equação a seguir:

$$N \cdot \sum_{j=a,b,c} d\phi_j/dt = 3 \cdot (r_{sj} \cdot i_{delta} + l_{sj} \cdot di_{delta}/dt) \quad (4.4)$$

A partir da equação 4.4 se faz possível determinar o valor da corrente de delta e deduzir da corrente de inrush.

4.6 Resumo da Metodologia

Diante da definição dos cálculos e procedimentos necessários para determinação da curva de saturação de transformadores de potência tendo como base medições das tensões e correntes durante energização, foi possível desenvolver um software para aplicação da metodologia descrita onde os seguintes passos foram implementados:

- Monitoração on-line das tensões e armazenamento da forma de onda no instante de desenergização do transformador;
- Determinação dos fluxos residuais nas colunas/culatras no núcleo ferromagnético do transformador após a abertura monofásica do disjuntor (abertura individual dos polos);
- Monitoração on-line das tensões e correntes de energização do transformador e armazenamento das respectivas formas de onda;
- Determinação do fluxo magnético nas colunas do transformador durante os primeiros 4,166 ms (1/4 de ciclo a 60Hz), após concluído o fechamento dos contatos do disjuntor;
- Gerar a curva de saturação ($\phi \times i$) do transformador e ajustá-la considerando o fluxo residual;

A

Figura 4-16 mostra de maneira simplificada o processo proposto nesse trabalho para definição da curva de saturação.

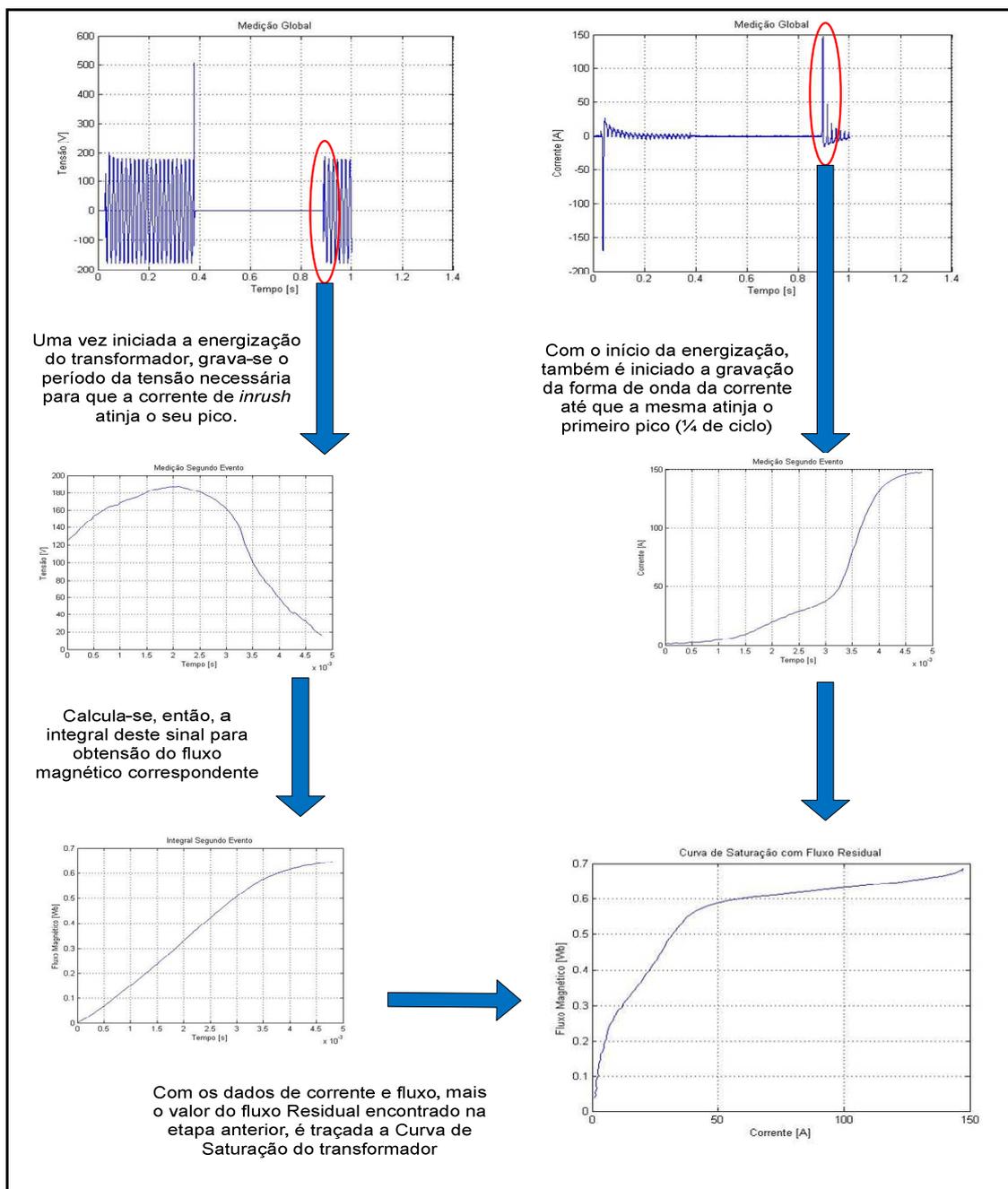


Figura 4-16 – Processo medição da curva de saturação.

Fonte: Próprio autor

4.7 Ensaios de Laboratório

Para o teste da metodologia de medição da curva de saturação de transformadores de potência a ser implementada em um hardware e software, os quais constituirão o dispositivo desenvolvido nesse trabalho, batizado com nome “Saturômetro”, realizou-se ensaios no laboratório de alta tensão do Instituto Lactec, em um transformador de distribuição de energia destinado à ensaios laboratoriais, apresentado na Figura 4-17.

Vale salientar que esses primeiros ensaios tiveram o objetivo de verificar se a curva medida através da metodologia apresentaria as características de uma curva de saturação e, a partir dos resultados, seguir com as etapas de desenvolvimento do software e hardware.

4.7.1 Montagem Laboratorial



Figura 4-17– Transformador utilizado nos ensaio de laboratório.

Fonte: Institutos Lactec

Com respeito à aplicação dos sinais de tensão, foram utilizados os sinais provenientes direto da subestação de alimentação do laboratório de alta tensão do Lactec e para coleta e armazenamento dos sinais de tensão e corrente foi empregado o oscilógrafo da Yokogawa DL 750 / ScopeCorder de 16 canais. Tal equipamento possui taxa de amostragem de 20 kHz (50 μ s), que permitiu obter cerca de 330 pontos por ciclo de 60 Hz.

Foi necessária a realização uma primeira energização e em seguida a desenergização do transformador para ser possível o cálculo do fluxo residual, conforme apresentado no item 4.4. Na sequência o transformador foi novamente energizado de forma a se obter a corrente de energização. O diagrama da montagem laboratorial é apresentado na Figura 4-18.

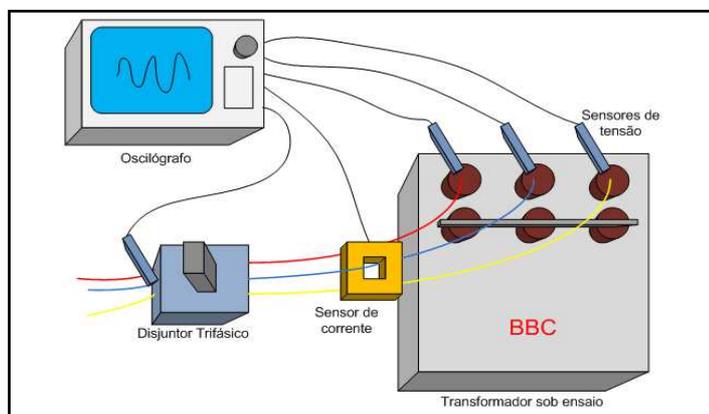


Figura 4-18 – Esquema laboratorial para ensaio de chaveamento de transformador

Fonte: Próprio autor

4.7.2 Tratamento dos Dados

De posse dos dados obtidos pelo oscilógrafo e empregando o algoritmo com a sequência de cálculos desenvolvido em ambiente MatLab, deu-se o tratamento dos sinais que culminaram com a obtenção da curva de saturação do transformador. Na Figura 4-19 é mostrada a curva de saturação medida através do ensaio realizado.

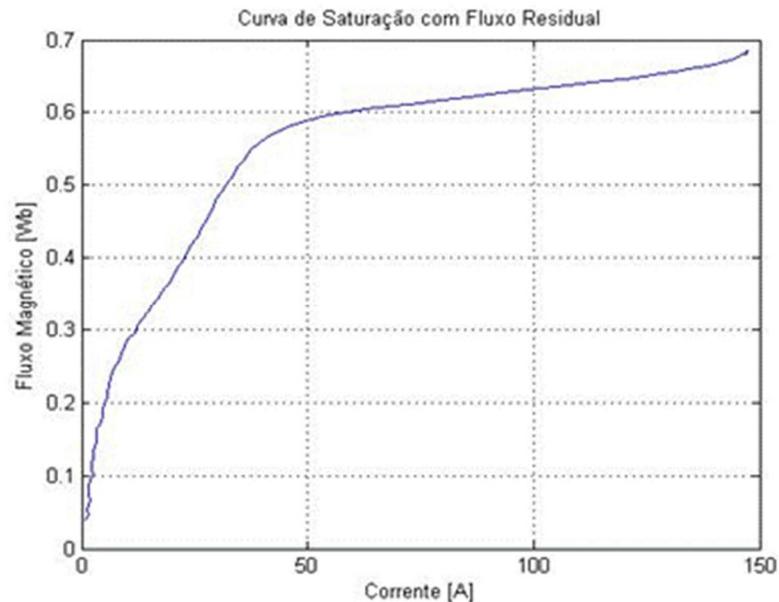


Figura 4-19– Curva de saturação medida em ensaio de laboratório.

Fonte: Próprio autor

Como pode ser observado na Figura 4-19 a curva levantada apresentou características satisfatórias, atendendo ao objetivo dos ensaios realizados. Vale salientar que a metodologia completa foi validada com ensaios em campo, em transformadores do sistema de transmissão da Chesf, onde a curva medida será confrontada com a curva fornecida pelo fabricante.

Uma vez definida e validada a metodologia a ser utilizada, iniciou-se o desenvolvimento de um dispositivo, o qual foi intitulado Saturômetro, para medir e armazenar as formas de onda das tensões e correntes de desenergização e energização de transformadores, assim como a plataforma computacional utilizada para o tratamento matemático necessário para o cálculo da curva de saturação e apresentação dos resultados de interesse. Os detalhes da especificação e desenvolvimento do hardware e software que compõe o dispositivo Saturômetro, serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO SATURÔMETRO

Neste capítulo são apresentados os detalhes da estrutura do hardware e software do dispositivo desenvolvido nesse trabalho para levantamento da curva de saturação de transformadores de potência.

5. Desenvolvimento do Dispositivo Saturômetro

O Saturômetro consiste em um equipamento destinado à obtenção das curvas de saturação de transformadores de potência, a partir do registro das formas de onda durante a energização e desenergização dos mesmos, cuja metodologia foi descrita no capítulo 4. Para tanto, foram desenvolvidos um módulo de medição, que é composto do hardware necessário para o registro das formas de onda de tensão e corrente, e uma ferramenta computacional que possibilita a visualização e tratamento dos dados, bem como, o cálculo da respectiva curva de saturação.

Para aumentar a abrangência do uso da ferramenta computacional, o software foi desenvolvido de forma a permitir o cálculo da curva de saturação a partir de registros das formas de onda de tensão e corrente oriundas de outros oscilógrafos portáteis ou pela rede de oscilografia disponível nos sistemas de transmissão e geração da Chesf, ou ainda de outra empresa que queira fazer uso da ferramenta.

Desta forma, neste capítulo será apresentado o desenvolvimento da ferramenta computacional e do módulo de medição que compõe o dispositivo Saturômetro, como também suas funcionalidades.

5.1 Estrutura Básica do Dispositivo Saturômetro

O equipamento desenvolvido é constituído por um módulo de medição e um software próprio. A Figura 5-1 apresenta um diagrama esquemático do funcionamento do Saturômetro.

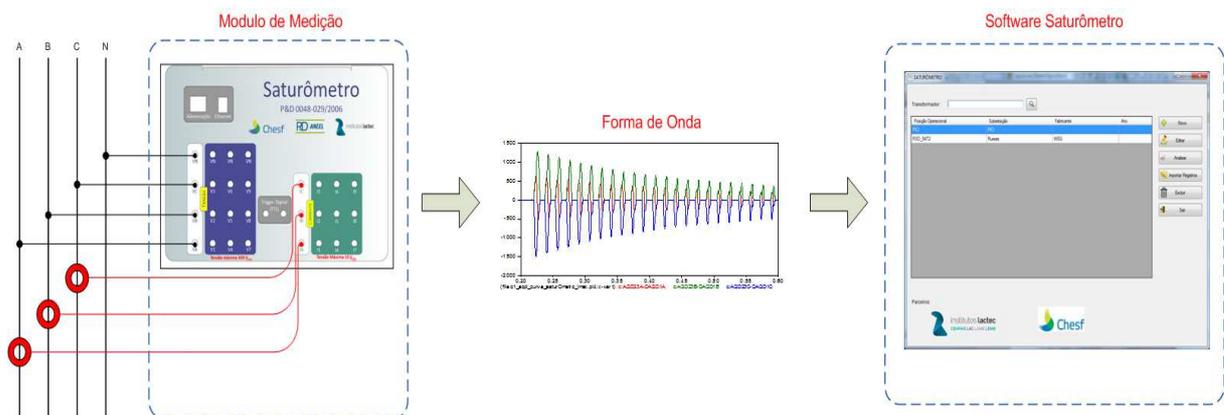


Figura 5-1 – Diagrama esquemático do funcionamento do dispositivo “Saturômetro”

Fonte: Próprio autor

Para registro das tensões e correntes de interesse, o módulo de medição é conectado no secundário dos respectivos TP e TC disponíveis no sistema elétrico que monitoram o transformador em questão, conforme mostrado na Figura 5-2.

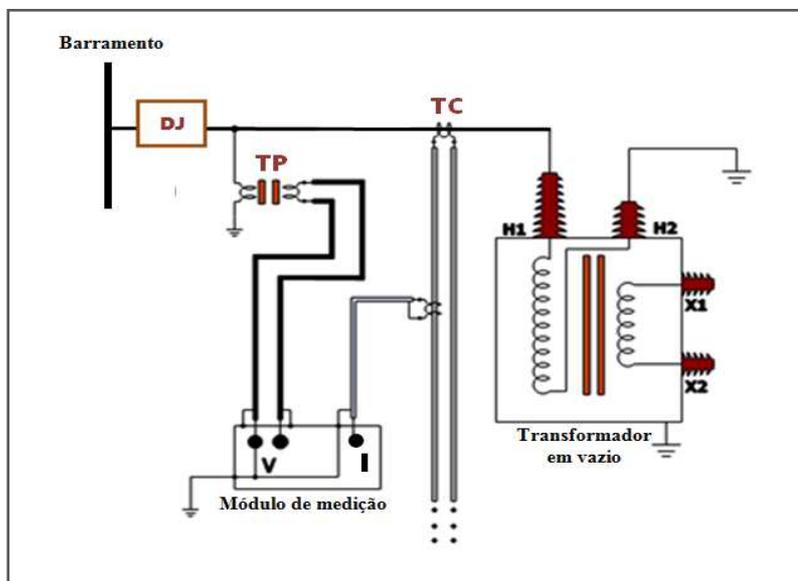


Figura 5-2 – Esquema do circuito para registro nas tensões e correntes
Fonte: Próprio autor

Os sinais de tensão de energização e desenergização do transformador monitorado são obtidos através dos terminais do enrolamento secundário do TP presentes na CT dos transformador, ou na falta desse pode ser usado o que se encontra no barramento que irá energizar o transformador.

Já as correntes de inrush são medidas através de pontas de prova (PP) de corrente, conectadas no secundário dos TC da CT do lado no qual o equipamento será energizado.

Para importação das formas de onda registradas pelo módulo de medição do Saturômetro, é necessário que um computador, contendo a ferramenta computacional, esteja conectado com o módulo no momento da medição, uma vez que as grandezas são enviadas ao software via comunicação Ethernet.⁴ No entanto, para levantamento da curva de saturação a partir das formas de onda das tensões de desenergização e energização e da corrente de inrush

⁴ Ethernet é uma arquitetura de interconexão para redes locais (Local Area Network - LAN). Ela define cabeamento e sinais elétricos para a camada física, em formato de pacotes e protocolos para a subcamada de controle de acesso ao meio (Media Access Control - MAC) do modelo OSI. O Modelo OSI (Open System Interconnection) é um modelo de rede de computador referência da ISO dividido em camadas de funções, criado com objetivo de ser um padrão, para protocolos de comunicação entre os mais diversos sistemas em uma LAN, garantindo a comunicação entre dois sistemas computacionais (end-to-end). A Ethernet foi padronizada pelo IEEE 802.3. A partir dos anos 90, ela vem sendo a tecnologia de LAN mais amplamente utilizada e tem tomado grande parte do espaço de outros padrões de rede.

já registradas, seja pelo módulo de medição desenvolvido, seja pela importação de outros oscilógrafos, a execução do software pode ser feita em qualquer computador conectado ou não ao módulo de medição.

O módulo de medição foi desenvolvido utilizando o sistema de aquisição de dados da National Instruments. Para a configuração, controle e aquisição de dados do módulo de medição, foram desenvolvidos algoritmos específicos, os quais foram implantados na ferramenta computacional do Saturômetro, cujos detalhes do desenvolvimento de ambos são apresentados a seguir.

5.2 Ferramenta Computacional Saturômetro

Nesta seção será apresentada a estrutura do software desenvolvido, detalhadas cada uma de suas funcionalidades e parâmetros de entrada e saída.

O software desenvolvido procurou atender ao requisito preliminar de ser simples, ter interface amigável e ser gerado a partir de uma plataforma que não necessite de grande esforço computacional. Para tanto o software possui as seguintes funcionalidades:

- a) Cadastro dos transformadores, como suas principais características, originando um banco de dados próprio;
- b) Armazenamento das grandezas de interesse medidas durante a energização e desenergização dos transformadores;
- c) Detecção dos instantes de chaveamento;
- d) Importação dos dados de medição feita pelo dispositivo Saturômetro ou por outros oscilógrafos, estando estes em formato Comtrade;
- e) Cálculo da curva de saturação com base nas curvas de tensão e correntes importadas;
- f) Comparação gráfica da curva fornecida pelo fabricante com a curva de saturação calculada pela ferramenta Saturômetro;
- g) Exportação da curva resultante em formato ATP;

A fim de facilitar a compreensão do funcionamento do software, Figura 5-3 apresenta um diagrama da estrutura do software no qual é possível visualizar suas principais funcionalidades.

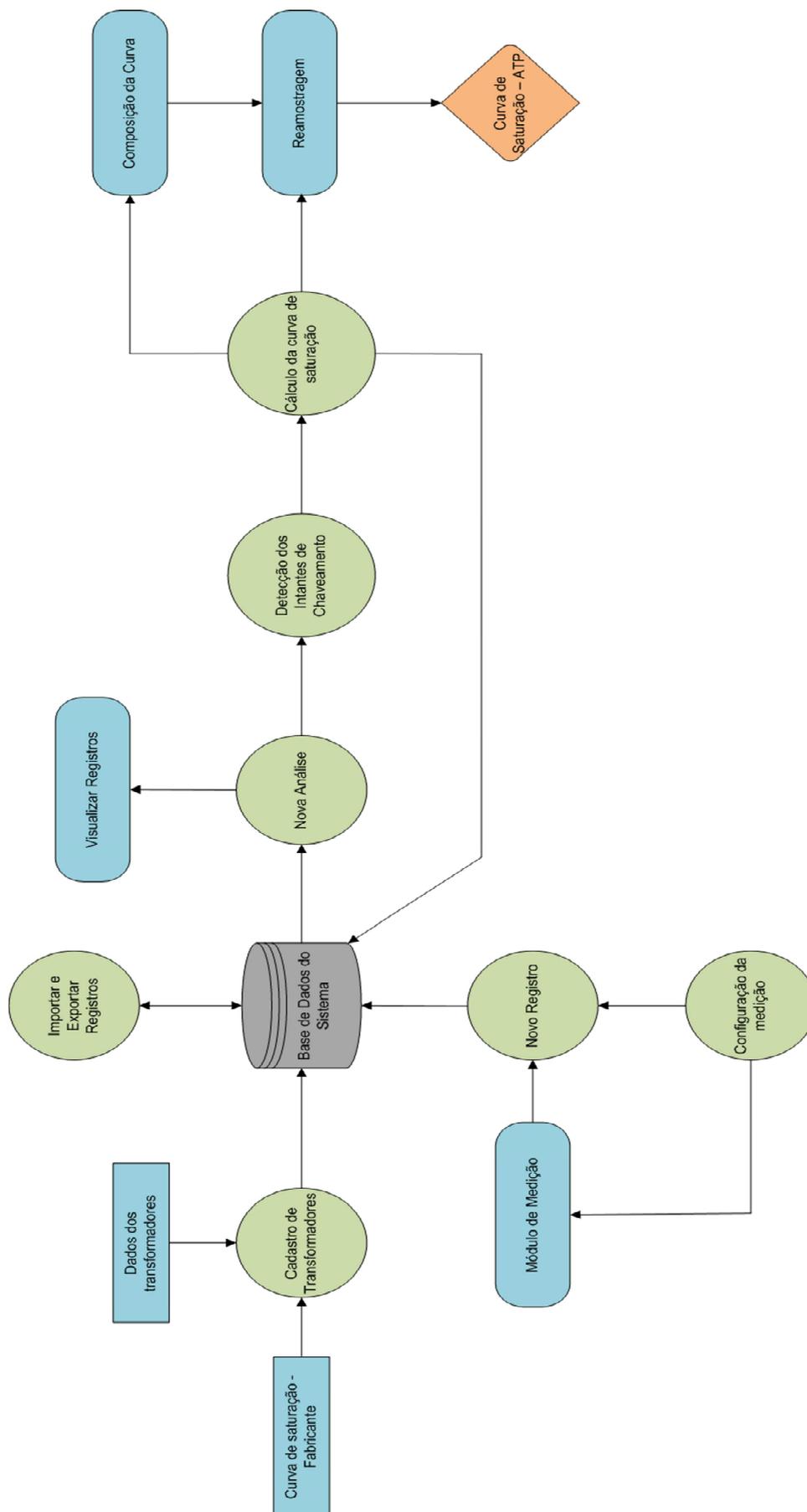


Figura 5-3 - Estrutura da ferramenta computacional do Saturômetro
 Fonte: Próprio autor

5.2.1 Plataforma Computacional

A ferramenta computacional Saturômetro foi desenvolvida através da Plataforma C# [28] devido a diversas características como simplicidade, custo e facilidade de interagir em ambiente web, que definiram esta plataforma como solução mais adequada. Tal desenvolvimento foi realizado no ambiente do Visual Studio ⁵[29]

C# foi desenvolvida pela Microsoft como parte da plataforma “.NET”. A sua sintaxe foi baseada no C++, mas usa também em sua base algumas das estruturas de outras linguagens de programação, como Object Pascal e Java.

O C# é uma linguagem de programação visual dirigida por eventos e totalmente orientada a objetos. Permite conversar com software de diferentes linguagens. Além disso, os aplicativos C# podem interagir pela Internet usando protocolos padrões, como *SOAP* (protocolo de acesso a objetos simples) e *XML* (linguagem de marcação extensível). Ele fornece programação orientada a objetos, *strings*, elementos gráficos, processamento de arquivos, estruturas de dados pré-empacotadas, processamento de banco de dados. Fortemente tipada, o que ajuda a evitar erros por manipulação imprópria de tipos e atribuições incorretas.

5.2.2 Desenvolvimento do Software

Como comentado anteriormente, o software desenvolvido faz uso da linguagem de programação C# e apresenta duas funcionalidades distintas:

- a) Aquisição de Sinal
 - b) Geração da Curva de Saturação
- **Aquisição dos sinais de tensão e corrente**

A primeira funcionalidade da ferramenta computacional diz respeito à aquisição das formas de onda de tensão e corrente, estabelecendo uma comunicação, através de interface Ethernet, com o sistema de digitalização da National Instruments. Através desta comunicação é possível armazenar os dados de tensão e corrente do transformador nos instantes de energização e desligamento. Figura 5-4 apresenta de forma sucinta a funcionalidade denominada “Aquisição de Sinal”.

⁵ Microsoft Visual Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado da Microsoft para desenvolvimento de software especialmente dedicado ao .NET Framework e às linguagens Visual Basic, C, C++, C# e J#.

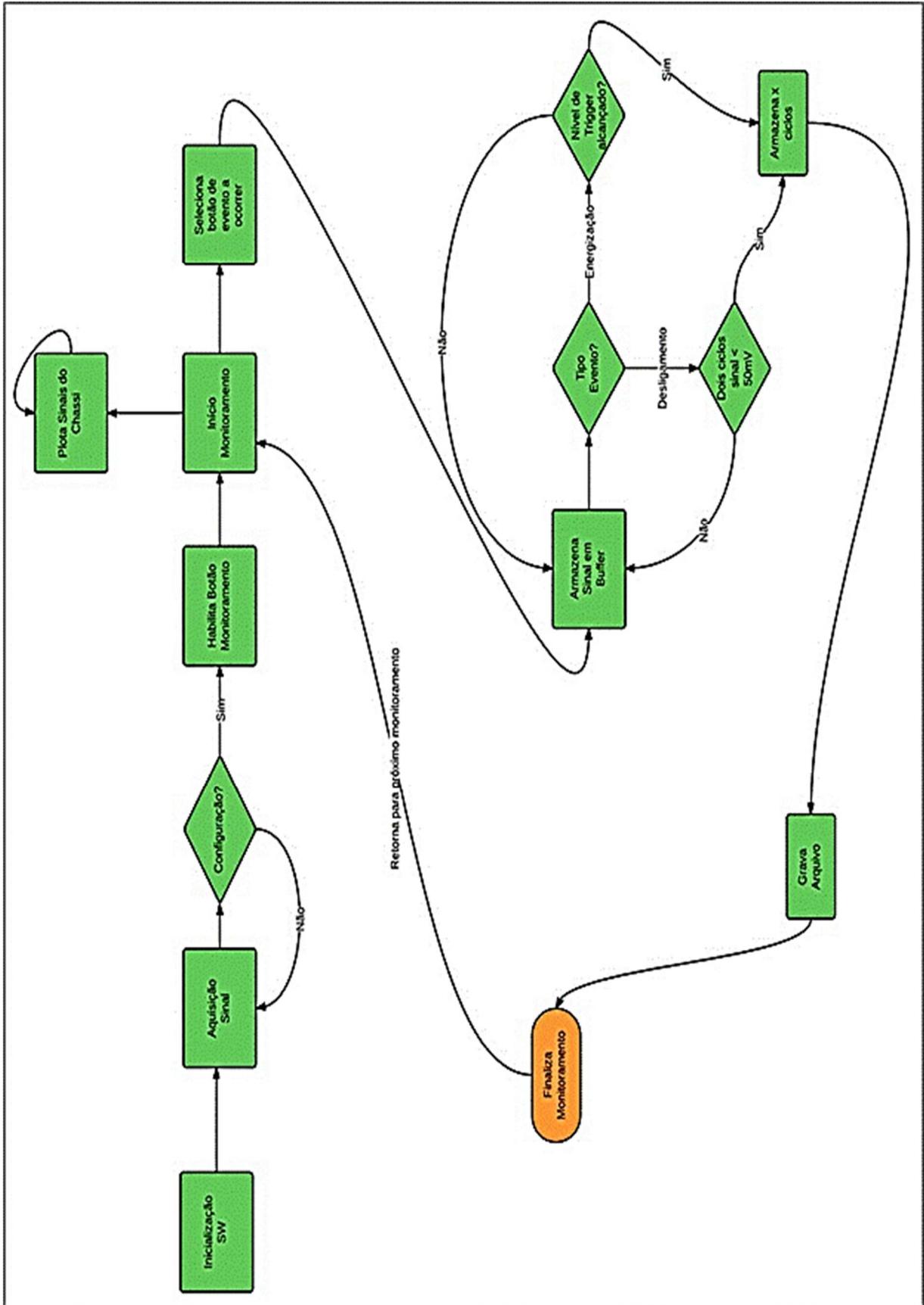


Figura 5-4 - Fluxograma da funcionalidade “Aquisição de Sinal”

Fonte: Próprio autor

Para aquisição das formas de onda de tensão e corrente, primeiramente é necessário realizar a configuração do sistema de medição. Nesta configuração deve-se selecionar o número de fases a serem monitoradas e as relações de transformação dos equipamentos utilizados para medição, sendo estas definidas pelos TP, TC, presentes na subestação, responsáveis pela monitoração do transformador que será energizado e pelas pontas de prova de corrente utilizadas pelo módulo de medição. Ainda na configuração, é necessário acrescentar quais os valores máximos de tensão e corrente que os cartões de monitoramento irão medir e indicar a corrente (nível de trigger) a partir da qual o evento de energização do transformador será gravado. Uma vez realizada a configuração de ensaio, o software habilitará o monitoramento.

Na energização o dispositivo Saturômetro aguardará até o nível de trigger ser atingido. Uma vez disparado este trigger e armazena os dados referentes ao tempo pré-ajustado para a oscilografia antes e após o evento.

No desligamento o sistema aguardará dois ciclos pelo instante em que o valor de pico do sinal fique abaixo de 50mV. Quando detectado, são armazenados dados referentes à 1 segundo antes e 1 segundos depois do evento.

- **Geração da curva de Saturação**

Com as informações do desligamento e da energização dos transformadores, é possível acessar a segunda funcionalidade do software, que é a de geração da curva de saturação de transformadores. O fluxograma apresentado na Figura 5-5 a mostra o funcionamento da funcionalidade denominada “Gera Curva”.

Com as informações do desligamento e de energização do transformador, armazenadas pela funcionalidade de monitoramento, é possível gerar a curva de saturação de um transformador. No caso de um transformador trifásico, serão geradas três curvas diferentes.

Primeiramente, carregam-se as informações do desligamento e da energização, sendo que os instantes da energização e do desligamento são selecionados automaticamente pelo software. Caso haja a necessidade de alteração destes instantes, pode-se alterar manualmente. Uma vez confirmados os instantes de energização e de desligamento, são realizados os cálculos e a curva de saturação para cada fase do transformador é gerada.

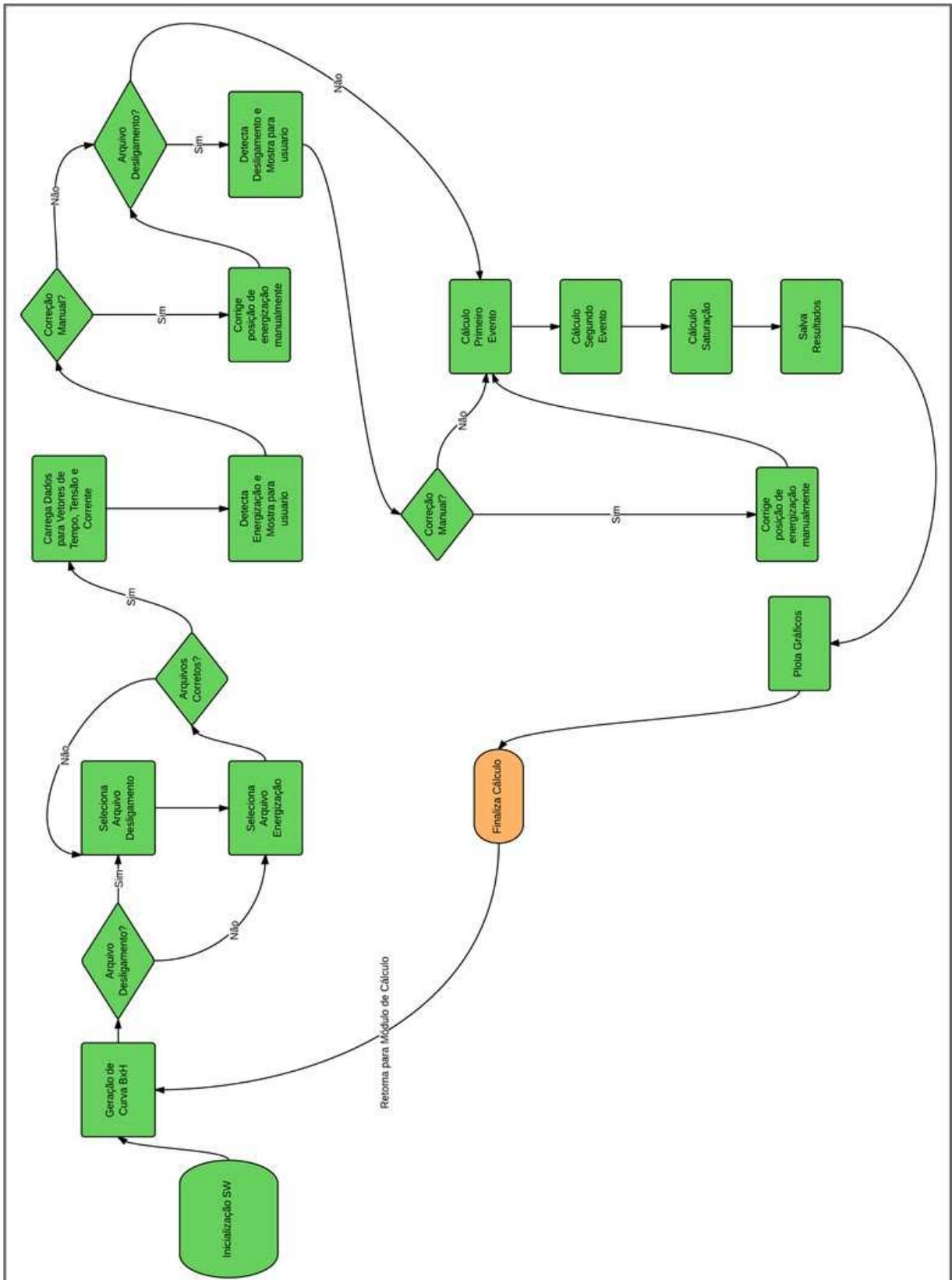


Figura 5-5 - Fluxograma da funcionalidade “Gera Curva”

Fonte: Próprio autor

5.3 Módulo de Medição

Atualmente, existe um número considerável de equipamentos que podem ser utilizados para monitoração de fenômenos eletromagnéticos transitórios. A escolha por um ou outro dependerá do fenômeno que se deseja monitorar e da precisão aspirada. Para selecionar e utilizar o tipo correto de equipamento é requerido que o usuário compreenda as capacidades e limitações do instrumento, suas respostas às variações do sistema de potência e os objetivos específicos da análise.

5.3.1 Especificação do Hardware

Para atender aos objetivos desse trabalho, o módulo de medição do Saturômetro foi desenvolvido procurando atender os seguintes requisitos:

Número de canais (tensão e corrente): Possuir no mínimo menos três entradas de sinais de tensão e outras três de corrente.

Especificações de temperatura: Pelo fato de que este equipamento será utilizado em subestações da Chesf, onde a temperatura ambiente pode atingir valores próximos à 40°C, o hardware deve suportar temperaturas superiores a 50°C.

Robustez: Suportar impactos mecânicos leves sem comprometer a conexão dos componentes elétricos e eletrônicos e nem causar qualquer avaria física. Da mesma forma, o case onde o equipamento será encapsulado deve ser inflamável.

Classe de isolamento: Uma vez que os sinais disponíveis para medição são de baixa tensão, o equipamento deve possuir classe de isolamento típica de baixa tensão, ou seja, por volta de 600 V.

Alta taxa de amostragem: Para se conseguir uma precisão superior na medição da curva de saturação de transformadores, é necessário que o dispositivo possua uma taxa de amostragem igual ou superior a 1024 amostras por ciclo de 60 Hz. Desta forma, utilizando somente o primeiro quarto da forma de onda da corrente de *inrush*, ter-se-ia uma amostragem mínima de 256 pontos.

Imunidade eletromagnética: Ter alta imunidade a campos elétricos e magnéticos visto que será utilizado em ambientes com altas emissões.

Portabilidade: É de fundamental importância que o equipamento seja portátil, podendo ser transportado de maneira fácil e rápida.

Facilidade de uso: Seja de fácil manuseio e possua interface de usuário e boa capacidade gráfica.

Capacidade de comunicação: Possuir portas de comunicação ethernet e USB para coleta de dados.

Desta forma, o equipamento deve possuir a estrutura básica de hardware, mostrada na Figura 5-6.

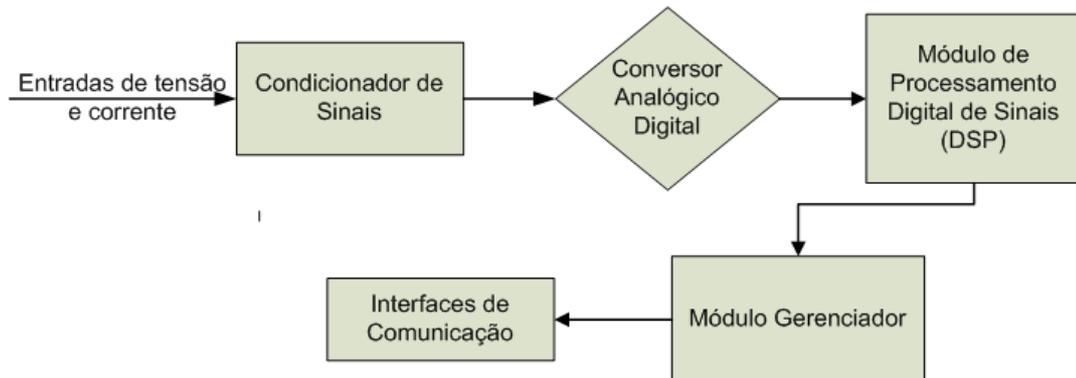


Figura 5-6 –Diagrama em blocos da configuração básica para o módulo de monitoração

Fonte: Próprio autor

Com base nas características técnicas listadas, foi decidido utilizar plataformas de hardware universais disponíveis comercialmente e consagrados na realização de medidas de grandezas elétricas.

Dentre as plataformas universais mais conhecidas, nacional e internacionalmente, que integra as diversas funções apresentadas no diagrama de blocos da Figura 5-6, foi escolhida a plataforma CompactDaq da National Instruments (NI). O módulo de medição foi então desenvolvido utilizando o sistema de aquisição de dados NI CompactDaq 9188. Lembrando que toda a parte de configuração, controle e aquisição de dados do módulo de medição é realizada através do software do Saturômetro, e por isto é necessário que um computador esteja conectado com o módulo no momento da medição.

Na Tabela 5-1 são apresentados os componentes de hardware utilizados na montagem do módulo de medição.

Tabela 5-1 - componentes utilizados na montagem do módulo de medição

<p>Chassi para 8 Slots</p>	<p>NI cDaq – 9188 8 – Slot Ethernet Chassis</p>	
<p>Cartão para medição de corrente</p>	<p>Módulo de entrada analógico com 4 canais (24 bits, 10V pk)</p>	
<p>Cartão para medição de tensão</p>	<p>Módulo de entrada analógica com 3 canais (300Vrms)</p>	
<p>Cartão para medição do sinal de trigger</p>	<p>Módulo de entrada digital com 2 canais</p>	

Fonte: NI CompactDaq 9188

Uma vez montado o equipamento e implementada a metodologia computacionalmente, passou-se para a tarefa mais complicada, que foi o ajuste e comparação das medições com oscilógrafos profissionais de alto desempenho.

5.3.2 Ensaios para Validação do Módulo de Medição

Durante o desenvolvimento experimental do sistema, foram efetuados ensaios em laboratório para validação das curvas registradas pelo módulo de medição. Fez-se uma simulação de energização de um transformador com uma fonte trifásica e mediu-se o evento com o sistema desenvolvido e com um osciloscópio digital da Tektronix, modelo DPO 5104. A Figura 5-7 apresenta o circuito de ensaio efetuado.

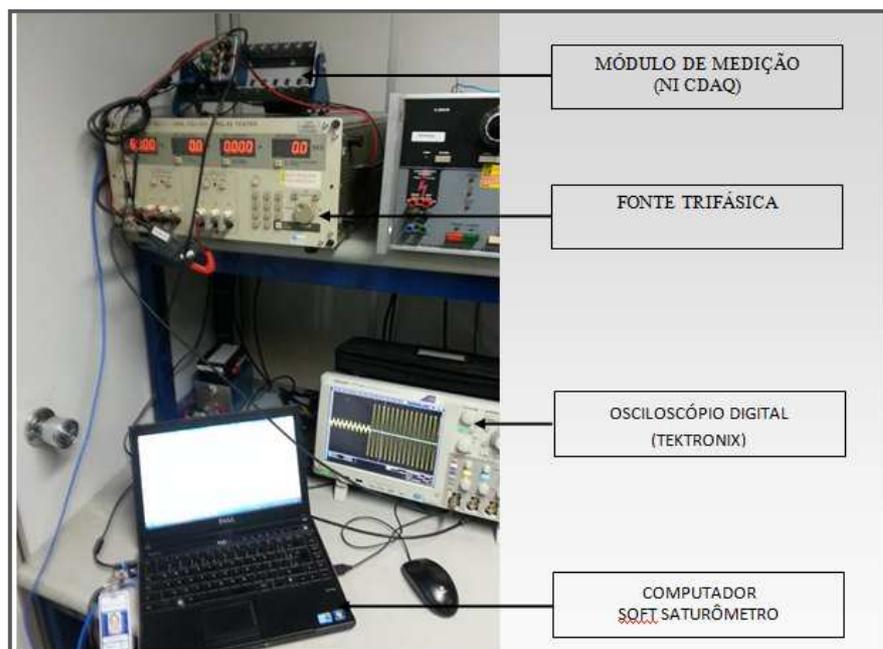


Figura 5-7 - Ensaio do módulo de medição
 Fonte: Próprio autor

Os sinais de tensão e corrente são medidos pelo módulo de medição (NI CDAQ). O software desenvolvido realiza a comunicação com o digitalizador da National Instruments através de uma interface de rede Ethernet. A Figura 5-8 apresenta o resultado da medição com o osciloscópio digital (em azul) e com o protótipo do Saturômetro (em verde).

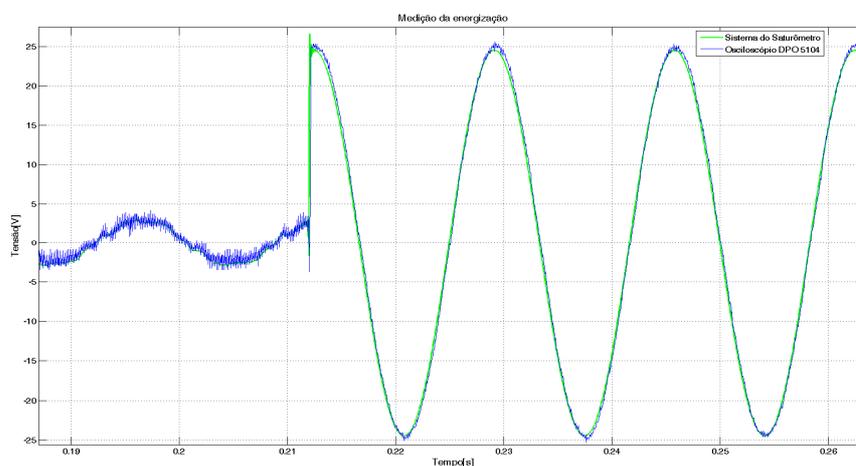


Figura 5-8 – Registro de tensão Saturômetro versus oscilógrafo comercial.
 Fonte: Próprio autor

Conforme demonstrado na Figura 5-8, fica evidente a confiabilidade das medições do sistema desenvolvido em comparação a uma curva medida por um osciloscópio digital, visto que as duas curvas se sobrepõem não apresentando desvios nas medições. A partir deste ponto, foram realizados testes para validação e ajustes finais, conforme apresentado nos capítulos a seguir.

CAPÍTULO 6

VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Apresenta a validação da metodologia a partir das formas de onda da tensão e corrente de inrush obtidas através de resultados de simulação em ATP, ensaios em laboratório e registros disponibilizados pela Chesf.

6. Validação da Metodologia

Neste capítulo são apresentados os resultados de validação da metodologia proposta nesse trabalho para medição de curva de saturação de transformadores de potência utilizando o software desenvolvido, sendo as formas de onda da tensão e corrente de inrush obtidas de duas maneiras:

A) Resultados de simulação de energização de transformadores, em ATP.

Caso A1: Transformador monofásico 15kVA - 13,8kV/127V (Y/Y) – LACTEC;

Caso A2: Transformador trifásico 50 MVA - 230/69kV (Y/ Δ) – SE CCD/Chesf.

B) Registros de energização de transformadores, em campo, disponibilizados pela rede de oscilografia da Chesf:

Caso B1: Transformador trifásico 100 MVA-230/69/13,8kV (Y/ Δ /Y) da SE CTU;

Caso B2: Transformador trifásico 50 MVA - 230/69 kV (Y/ Δ) da SE CCD;

Caso B3: Transformador de 150 MVA - 230/69 kV (Y/ Δ) DA SE SRD;

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para cada um dos casos listados acima.

6.1 Levantamento da curva de saturação a partir de dados de simulação utilizando o ATP

A validação da metodologia proposta através de dados de simulação consiste em fazer o chaveamento de um transformador no ATP, com uma curva de saturação informada pelo fabricante e, a partir da tensão e corrente obtidas na simulação de energização desse equipamento, verificar se é possível reproduzir a mesma curva que foi representada no caso de estudo.

Para as simulações no ATP foi usado o modelo “Saturable Transformer”, não possibilitando a análise do fluxo residual, uma vez que as curvas inseridas nesse modelo consideram o fluxo residual como nulo. Dessa forma, a validação da metodologia por esse método irá focar apenas no levantamento da curva a partir dos resultados de simulação obtidos, considerando o fluxo residual zero.

6.1.1 Caso A1: Transformador Monofásico 15 kVA – 13,8 kV/127 V

Para simular o transitório de energização desse transformador, foi construído um circuito simples no ATP Draw, onde foi modelado um transformador monofásico de pequeno porte, com uma potência de 15 kVA, de dois enrolamentos, cujas tensões terminais são de 13,8 kV/127 V, uma chave ideal para manobra do transformador e uma a fonte, conforme demonstra Figura 6-1.

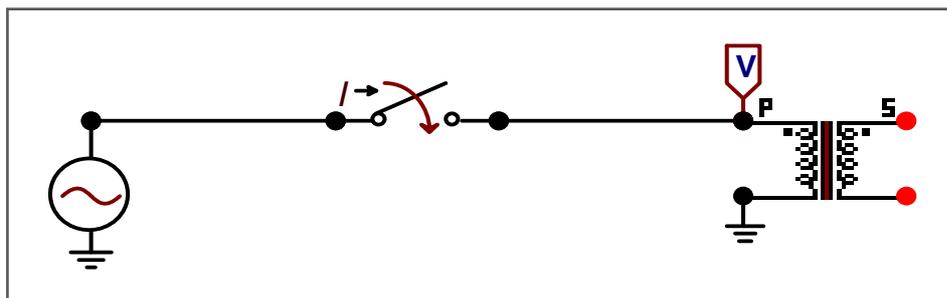


Figura 6-1- Modelagem em ATP Draw - Caso A1

Fonte: Próprio autor

Com esse modelo, é possível verificar se a metodologia proposta reproduz a curva de saturação inserida no ATP Draw para diferentes condições de chaveamento. Para tanto, foram realizadas a energização do mesmo transformador em pontos distintos na forma de onda da tensão, ou seja, nos tempos de chaveamento (t_{on}) correspondentes aos ângulos 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315° da forma de onda da tensão do barramento fonte.

O método de validação dos dados de simulação irá consistir em uma versão simplificada da metodologia completa apresentada na seção anterior, conforme demonstra a Figura 6-2 a seguir.

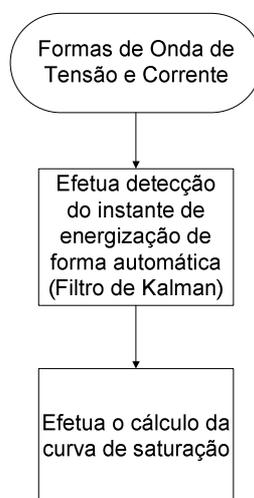


Figura 6-2– Método de validação a partir de dados de simulação.

Fonte: Próprio autor

Chaveamento em 45°

Figura 6-3 mostra o resultado de tensão e corrente de energização do transformador à 45° da forma de onda de tensão. Nesse caso, a corrente chega a um valor máximo de 1,15 A e para facilitar a visualização, a corrente teve sua escala aumentada (fator de 10.000). A partir desse resultado foi calculada a curva de saturação e está comparada com a curva modelada no ATP, onde se verifica que a metodologia proposta reproduz de forma satisfatória a curva inserida no ATP, demonstrando que o método é capaz de encontrar a curva de saturação que representa o transformador em questão. Além disso, como a corrente de inrush chega a quase 1,2A, a curva de saturação obtida pela metodologia apresenta mais pontos que a curva inserida no ATP.

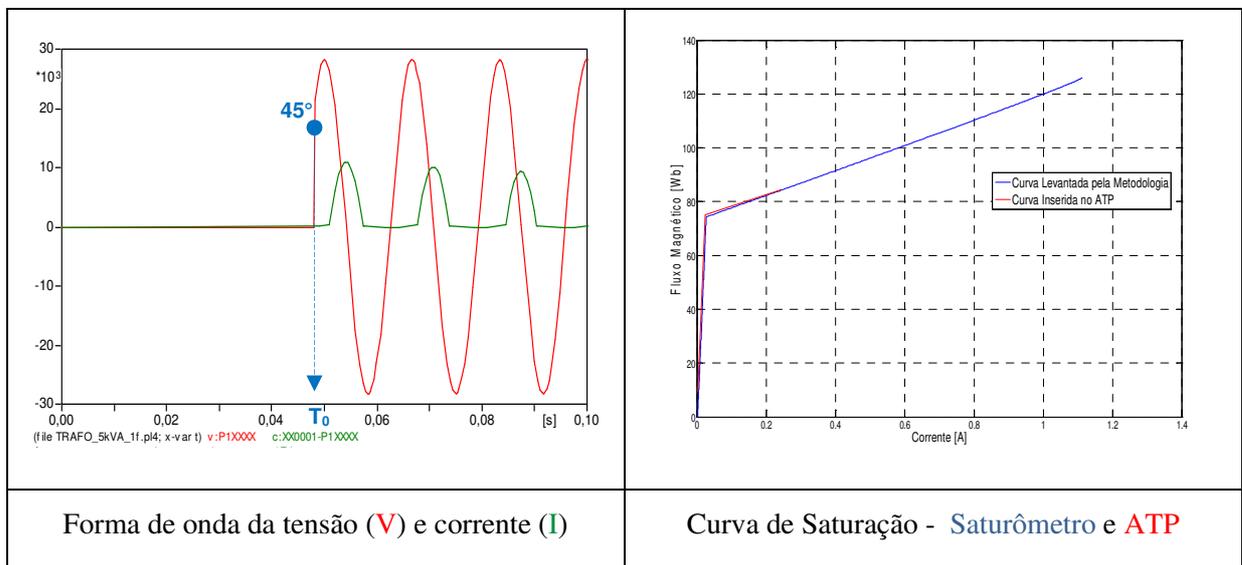


Figura 6-3 – Energização em 45°

Fonte: Próprio autor

Chaveamento em 90°

Para uma energização em 90°, ou seja, no pico máximo da tensão o transformador não entra em sua região de saturação, de forma que não se observa uma corrente de inrush significativa, como detalhado no item 3.9. Com isso, só é possível o levantamento da curva de magnetização da região linear, ou seja, não é possível calcular o joelho e o Xac para definição da curva de saturação, conforme mostrado na Figura 6-4. Essa é uma das limitações da metodologia proposta, uma vez que o sucesso da obtenção da curva de saturação está associado à magnitude da corrente inrush, logo ao instante de energização do transformador.

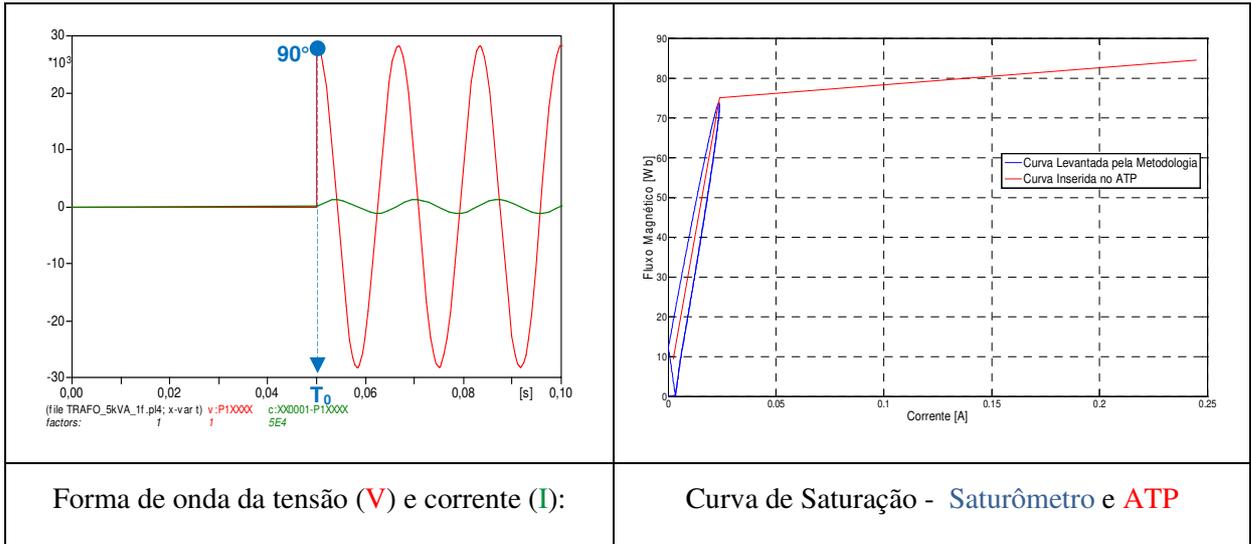


Figura 6-4– Energização em 90°

Fonte: Próprio autor

Chaveamento em 0°

O próximo caso apresenta a condição oposta à energização em 90°, em relação às magnitudes de corrente e fluxo. Uma energização em 0° da forma de onda de tensão levou a uma corrente máxima de inrush de 1,6 A e a partir dos dados de tensão e corrente foi obtida a curva de saturação correspondente, conforme mostrado na Figura 6-5. Neste caso, foi utilizado o processo de detecção automática do instante de energização e como é possível observar na Figura 6-5, existe uma diferença significativa entre a curva modelada no ATP e a curva obtida a partir dos sinais de tensão e corrente. A justificativa para essa diferença é que nesse caso, o processo de detecção automática determinou um instante de energização posterior ao instante real de energização.

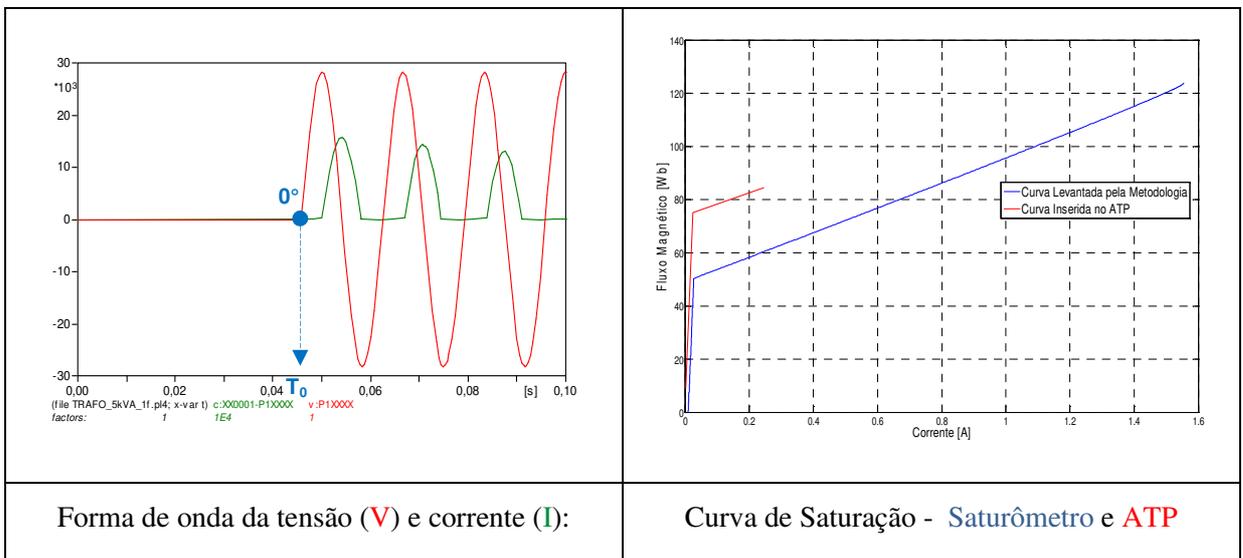


Figura 6-5 – Energização em 0° e com definição de instante de energização errado.

Essa diferença provoca uma integração errônea da forma de onda de tensão, levando a um cálculo de fluxo abaixo do esperado. Essa característica demonstra que a determinação precisa do instante de energização é fundamental para o levantamento adequado da curva de saturação. Para contornar esse problema, foi introduzido na ferramenta Saturômetro um módulo que permite refinar, manualmente, a determinação do instante de energização. Com isso, pode-se garantir que o instante de energização seja o mais próximo do valor real. Válido igualmente para a desenergização, utilizada no cálculo do fluxo residual.

Aplicando essa correção, observa-se que a curva obtida pela metodologia reproduz a curva inserida no ATP, tal qual foi obtido para o instante de energização em 45°, porém com valores de corrente e fluxo superiores, uma vez que nesse caso a corrente de inrush é superior. Conforme apresentado na Figura 6-6.

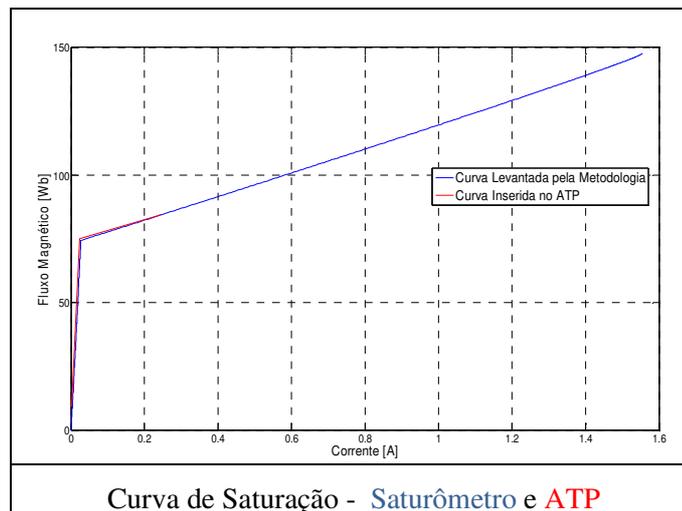


Figura 6-6 – Energização em 0° com instante de energização correto (aplicada a correção manual)

Fonte: Próprio autor

Chaveamento em 135°

A energização em 135° é muito parecida com a energização em 45°, porém nesse caso a corrente e a tensão possuem valores negativos no intervalo de tempo utilizado para o cálculo da curva, conforme exposto na Figura 6-7. Para facilitar a visualização da curva, optou-se por apresentar os valores de fluxo e corrente em módulo, de forma que a curva de saturação seja sempre apresentada nos seus valores positivos (primeiro quadrante). Esse procedimento será adotado como padrão para a exportação da curva do Saturômetro, uma vez que é o suficiente para representar as características de saturação de um transformador em um modelo padrão do ATP.

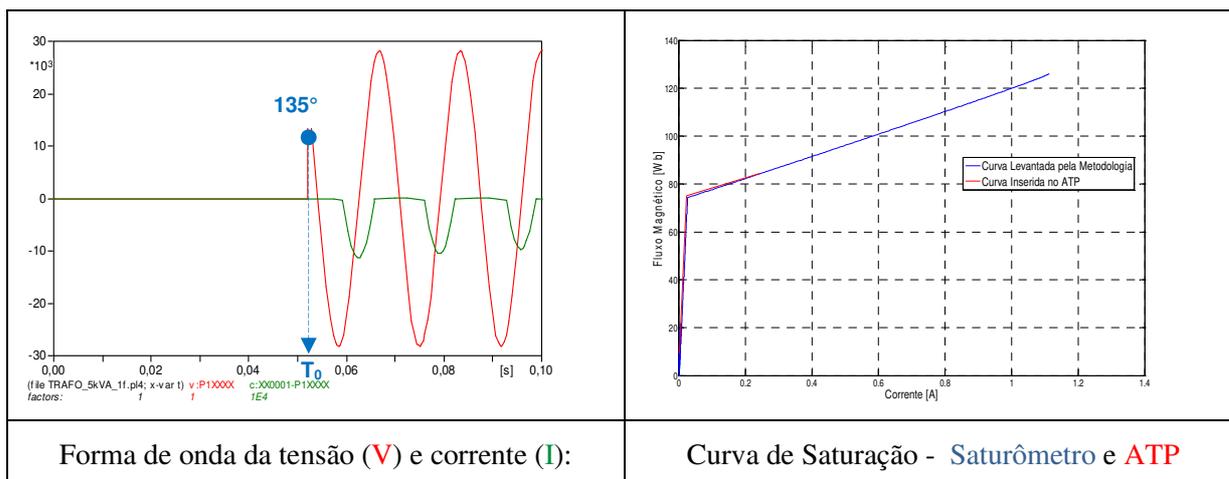


Figura 6-7 – Energização em 135°

Fonte: Próprio autor

Demais Chaveamentos

Os demais chaveamentos apresentam os mesmos resultados já demonstrados até aqui. Apenas para detalhar as semelhanças, as equivalências estão apresentadas a seguir:

A energização em 180° é análoga à energização em 0°, apresentando inclusive, as mesmas diferenças de detecção automática do instante de energização. As energizações em 225° e 315° são equivalentes à energização em 45° e, conseqüentemente, equivalente à energização em 135°. A energização em 90° é equivalente à energização em 270°, não apresentando corrente de inrush suficiente para levar o transformador à saturação.

6.1.2 Caso A2: Transformador trifásico 50 MVA 230/69kV (Y/Δ)

Foram realizadas simulações, em ATP, de energização de um dos transformadores em operação na SE Cícero Dantas (CCD) – Chesf. Da mesma forma que o caso anterior, as simulações foram realizadas em ATP Draw, conforme mostra a Figura 6-8. Destaca-se que foram monitoradas as tensões antes e depois do disjuntor, com o intuito de verificar as dificuldades de detecção do instante de chaveamento.

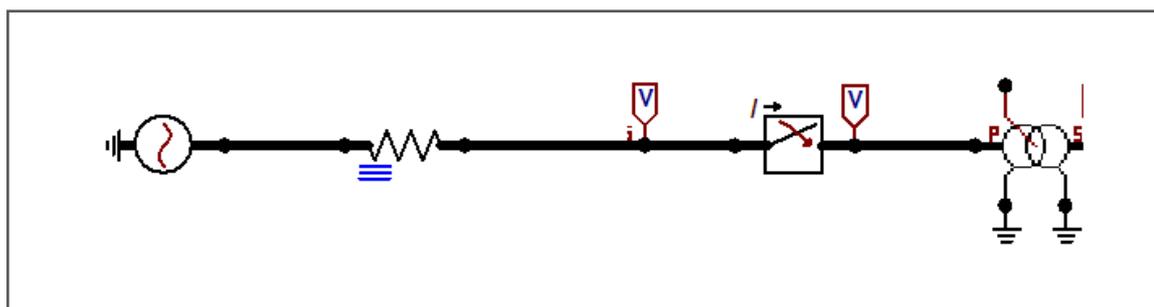


Figura 6-8 – Modelagem no ATP Draw: Energização do Transformador da SE CCD.

Fonte: Próprio autor

Uma ressalva importante para o caso trifásico é que a curva de saturação pode ser levantada para as três fases do transformador. Além disso, convém lembrar que não estão sendo consideradas energizações pelo lado em delta dos transformadores, uma vez que não é uma prática da Chesf realizar energizações pela baixa tensão dos transformadores.

Com o intuito de verificar a influência do cálculo da curva de saturação utilizando a tensão a montante do disjuntor, optou-se por apresentar dois casos de energização nos quais o instante de detecção é identificado incorretamente.

O primeiro deles, apresentado na Figura 6-11, considera um cálculo para o instante de detecção anterior ao instante verdadeiro de energização (1/4 de ciclo antes). A grande dificuldade de se utilizar a tensão a montante do disjuntor é a correta identificação do instante de energização na forma de onda de tensão, uma vez que em geral, esse instante é dificilmente detectado nesse modo de monitoramento. Com isso, diferentemente do observado para o monitoramento pós disjuntor, uma detecção anterior ao instante real da energização pode levar a um cálculo inválido para o fluxo, uma vez que a tensão não é nula antes da energização, para o monitoramento pré-disjuntor.

Nesse caso fica evidente que o fluxo calculado é superior ao fluxo de referência, dado pela curva do ATP, em função da integração de uma parcela que não deveria ser considerada, associada à tensão não nula antes da energização.

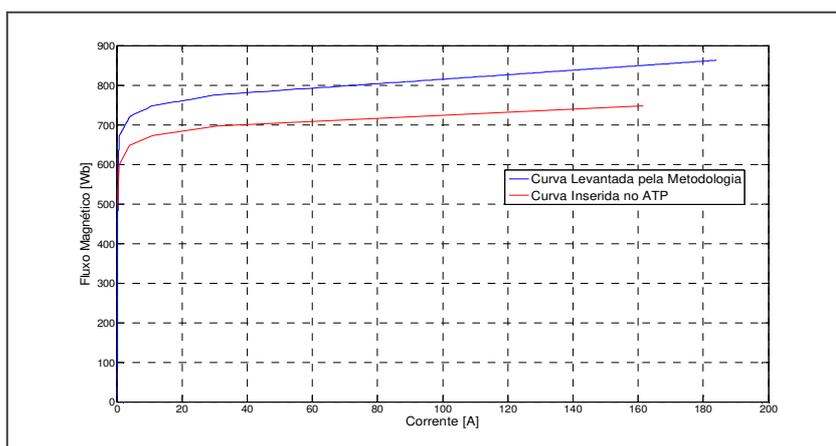


Figura 6-11 – Curva de Saturação considerando o instante de energização anterior ao verdadeiro e a tensão pré-disjuntor para o cálculo do fluxo

Fonte: Próprio autor

Já na Figura 6-12, está representado um caso bastante similar ao anteriormente, no qual o instante de detecção é determinado como posterior ao instante real de detecção (1/4 de ciclo depois). Novamente, o fluxo calculado é inferior à curva de referência – curva inserida no ATP.

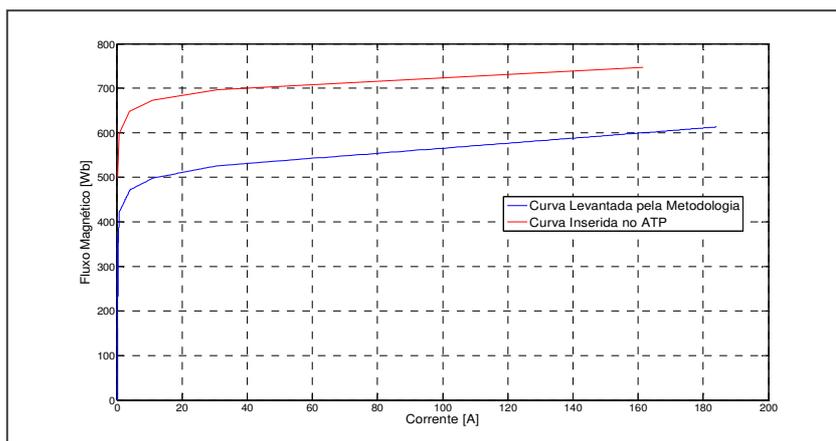


Figura 6-12 – Curva de Saturação considerando o instante de energização posterior ao verdadeiro e a tensão pré-disjuntor para o cálculo do fluxo

Fonte: Próprio autor

É importante destacar que nos casos em que se utiliza o instante de energização correto para o cálculo do fluxo, as respostas obtidas apresentam apenas pequenos desvios para elevados valores de corrente, como apresentado anteriormente. Esses dois casos serão importantes para analisar o comportamento das curvas obtidas para os dados reais, apresentados a seguir.

6.2 Levantamento da curva de saturação a partir de dados de medição em campo (oscilografia)

A outra estratégia usada para validação da metodologia proposta nesse trabalho consiste em levantar a curva de saturação a partir de registros oscilográficos da tensão e da corrente durante a energização de três transformadores da Chesf, conforme a seguir.

6.2.1 Transformador de 50MVA - 230/69kV (Y- Δ) da SE Cícero Dantas

O primeiro caso usado para validação da metodologia tomou como base os registros oscilográficos, já existentes, da energização do transformador 04T2 da SE CCD - Chesf, o qual foi energizado em vazio pelo lado de alta (230kV) através do respectivo disjuntor, 14T2. Neste caso, não se dispunha do registro da tensão da desenergização que antecedeu a reenergização registrada. Esta questão impossibilita a medição do fluxo residual a partir do método proposto no capítulo 4, item 4.4.

A Figura 6-13 mostra o diagrama operacional simplificado dos *bays* desse transformador, na qual pode se verificar os pontos de medição da corrente (TC 94T2) e da tensão (TP 84BP). Neste caso, não temos TP na CT do 04T2 o que traz dificuldade na detecção do instante de energização.

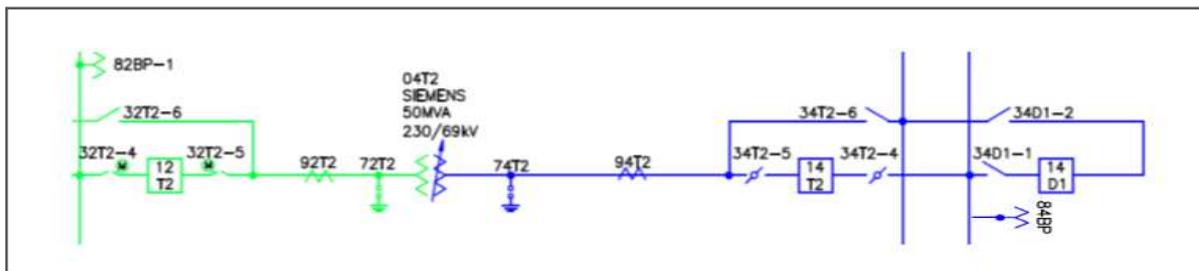


Figura 6-13 - Diagrama operacional simplificado do bay do TR 04T2 da SE CCD

Fonte: Próprio autor

As formas de onda da corrente de inrush, da fase que atingiu o maior valor de pico (fase A) e da respectiva tensão, durante a energização desse transformador, são mostradas na Figura 6-14 e a curva de saturação correspondente está representada na Figura 6-15.

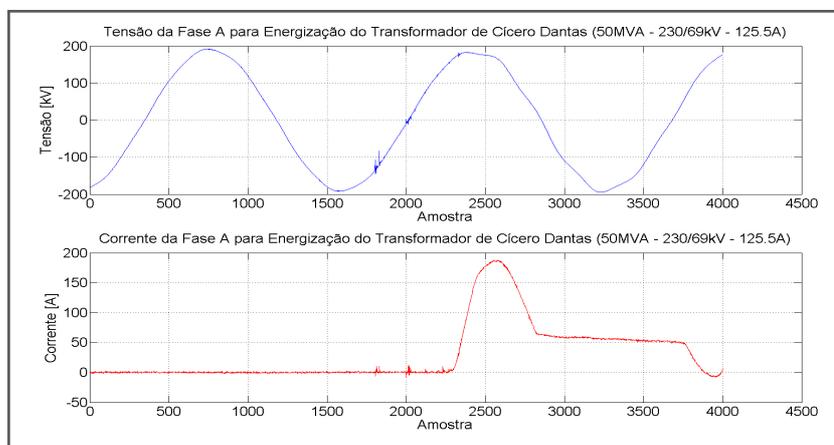


Figura 6-14 – Tensão e corrente para a energização do transformador de CCD – fase A

Fonte: Próprio autor

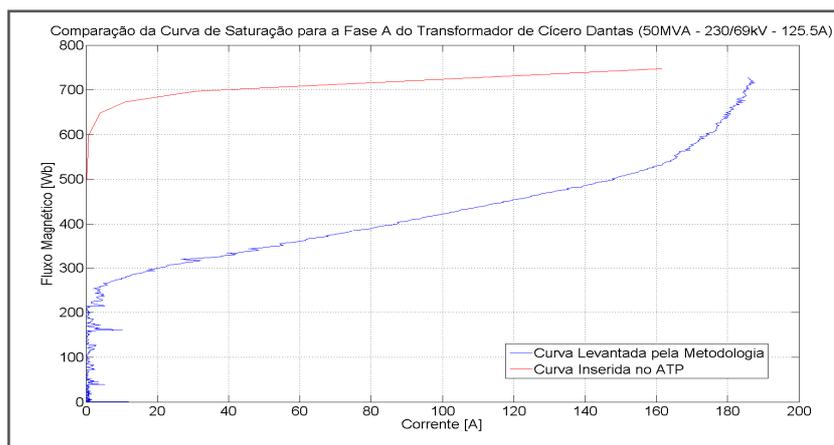


Figura 6-15 – Curva de saturação para a energização do transformador de CCD – fase A

Fonte: Próprio autor

Nota-se uma diferença significativa entre a curva obtida pela metodologia e a curva de referência, inserida na simulação do ATP, com base nos dados enviados pelo fabricante. Essa diferença pode ser função de dois fatores:

O primeiro deles está relacionado com o instante de energização. O método de detecção automática utilizou como referência o primeiro transitório existente na forma de onda de tensão. Porém, não existe uma informação que garanta que a fase em questão foi energizada exatamente nesse transitório. É possível que esse transitório seja decorrente da energização de uma das outras fases. Com isso, pode-se observar o problema de cálculo do fluxo em um intervalo errôneo, apresentado anteriormente.

O segundo fator está associado com o próprio fluxo residual. Para esse caso, não se tem informação do desligamento que antecedeu a energização desse transformador. Dessa forma, não se sabe o valor do fluxo que deve ser somado à curva obtida, com o intuito de compor o fluxo total no núcleo do transformador, para a fase em questão.

A Figura 6-16 mostra a corrente e tensão para a fase B da energização desse transformador.

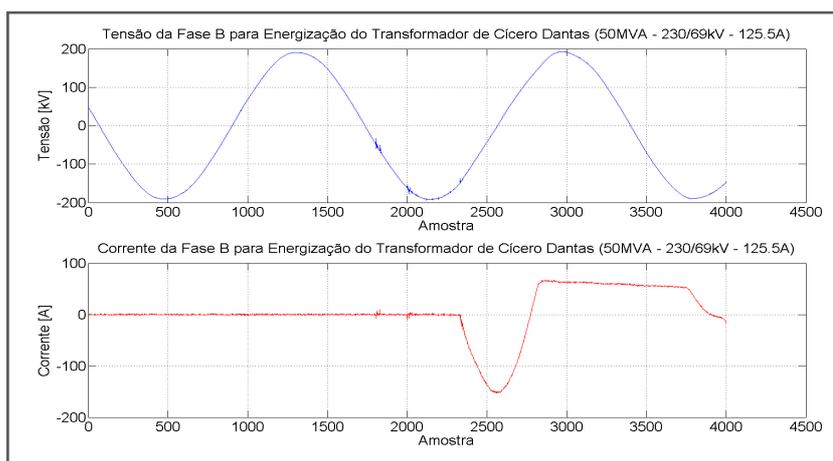


Figura 6-16 – Tensão e corrente para a energização do transformador de CCD – fase B
Fonte: Próprio autor

A curva de saturação resultante dessa energização está representada na Figura 6-17. Nesse caso, a curva obtida pela metodologia é mais próxima à curva inserida no ATP. É possível que nesse caso o fluxo residual seja nulo e o instante de energização utilizado no cálculo corresponde ao instante de energização da fase em questão.

Por último, na Figura 6-18 é mostrado o registro da tensão e corrente da fase C e na Figura 6-19 é apresentada a curva de saturação obtida.

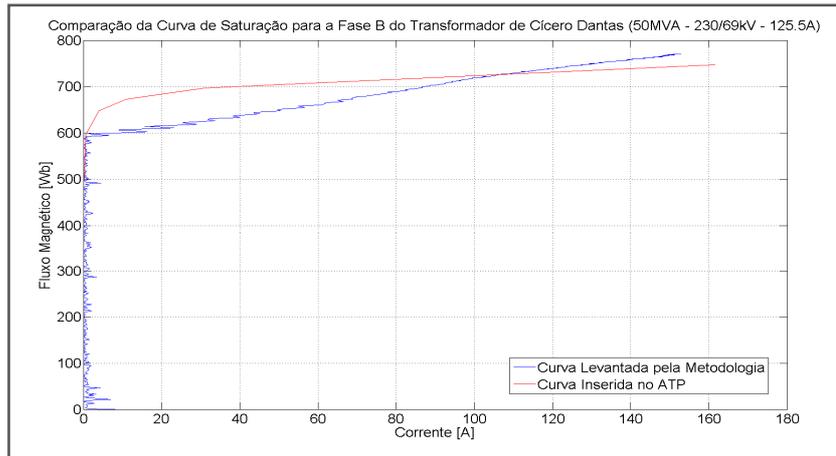


Figura 6-17 – Curva de saturação para a energização do transformador de CCD – fase B
 Fonte: Próprio autor

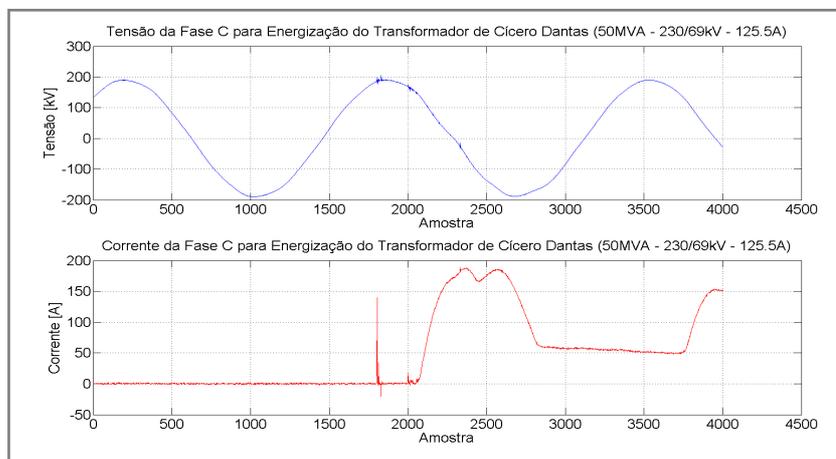


Figura 6-18 – Tensão e Corrente para a Energização do Transformador de CCD – fase C
 Fonte: Próprio autor

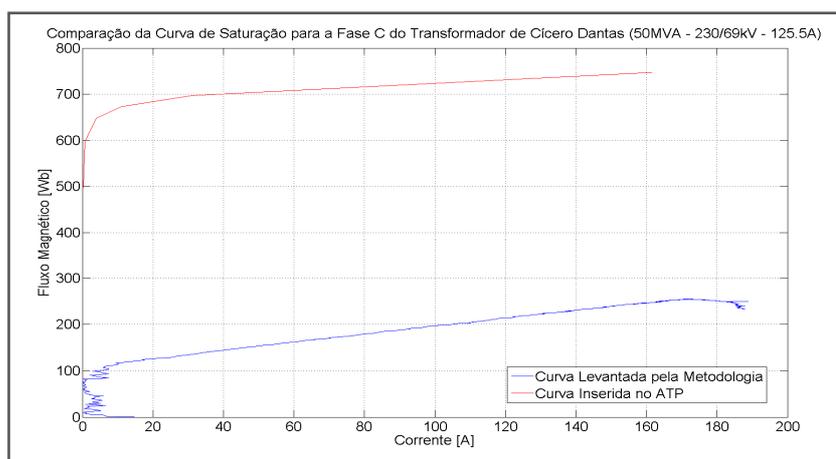


Figura 6-19 – Curva de Saturação para a Energização do Transformador de CCD – fase C
 Fonte: Próprio autor

No caso da fase C, observa-se que a inclinação foi reproduzida, ou seja, o X_{ac} , mas não se conseguiu reproduzir o joelho da curva de saturação fornecida pelo fabricante. Isto se deve ao fato de não se ter levado em consideração o fluxo residual no cálculo da curva.

6.2.2 Transformador de 100MVA - 230/69/13,8kV (Y- Δ -Y) da SE Catu

Para esse caso foi tomando como base registros oscilográficos, já existentes, da energização do transformador 04TX SE Catu (CTU), em vazio pelo lado de alta (230kV) através do respectivo disjuntor 14TX. Esse transformador se diferencia do caso anterior, 04T2- CCD, por ser um transformador de três enrolamentos, porém de mesma potência.

A Figura 6-20 mostra o diagrama operacional simplificado do bay desse transformador, no qual pode se verificar os pontos de medição da corrente (TC 94T1) e da tensão (TP 84BP). Neste caso, foi utilizado para detecção do instante de energização a medição da tensão do lado de 69kV uma vez que há um TP presente na CT de 69kV do 04T2.

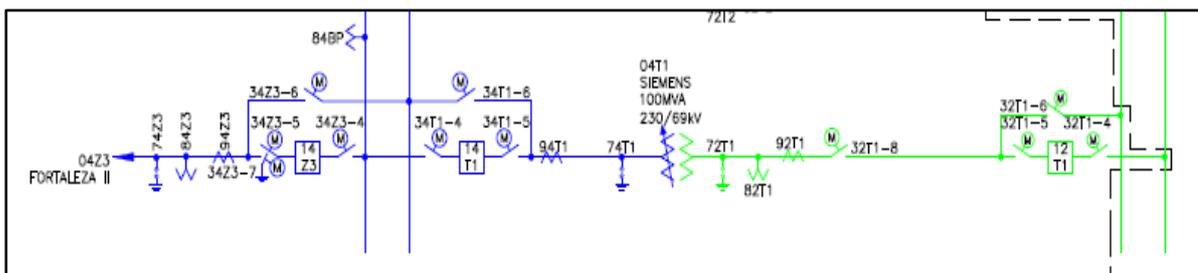


Figura 6-20 - Diagrama operacional simplificado do bay do TR 04T1 da SE CTU

Fonte: Próprio autor

As figuras a seguir mostram os registros da energização do transformador para cada uma das fases e a curva de saturação correspondente.

A Figura 6-21 apresenta o registro da tensão e corrente da fase A. Contudo, a corrente de inrush registrada teve um pico muito baixo, não sendo suficiente para calcular a região não linear da curva, como também pela falta da informação do fluxo residual não é possível calcular o joelho da curva, conforme resultado apresentado na Figura 6-22.

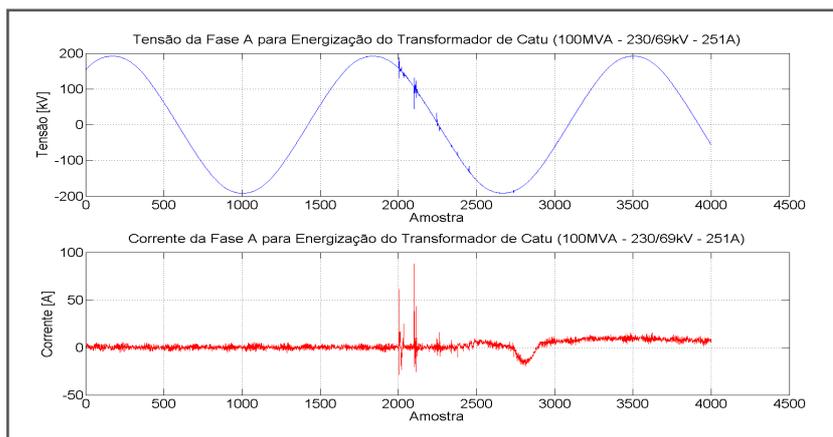


Figura 6-21– Tensão e corrente de energização do transformador de CTU – fase A
 Fonte: Próprio autor

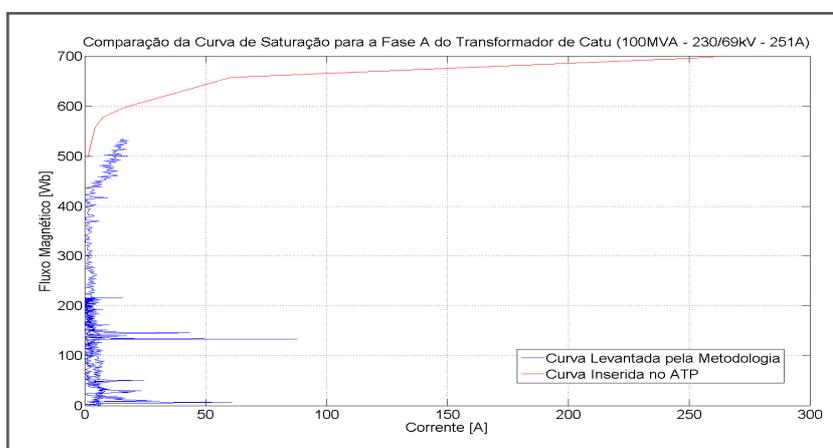


Figura 6-22– Curva de saturação para a energização do transformador de CTU – fase A
 Fonte: Próprio autor

A Figura 6-23 apresenta o registro da tensão e corrente da fase B. Nesta fase a corrente de inrush registrada teve um pico suficiente para calcular a região não linear da curva, mas falta informação do fluxo residual para se calcular o joelho corretamente, conforme resultado apresentado na Figura 6-25.

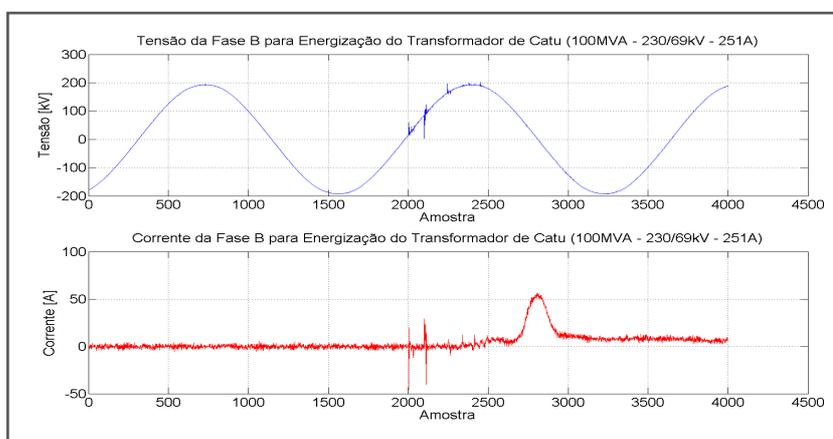


Figura 6-23– Tensão e Corrente para a Energização do Transformador de CTU – fase B
 Fonte: Próprio autor

Observa-se que na Figura 6-25, a curva obtida tem praticamente a mesmo X_{ac} da curva fornecida pelo fabricante, porém o joelho calculado está muito acima. Isto significa que para essa fase, possivelmente o fluxo residual foi negativo, e se considerado no cálculo, levaria a uma tensão de saturação menor.



Figura 6-24– Curva de Saturação para a Energização do Transformador de CTU – fase B
Fonte: Próprio autor

A Figura 6-25 apresenta o registro da tensão e corrente da fase C. Contudo, como no caso da fase A, a corrente de inrush registrada teve um pico muito baixo, não sendo suficiente para calcular a região não linear da curva, conforme resultado apresentado na Figura 6-26.

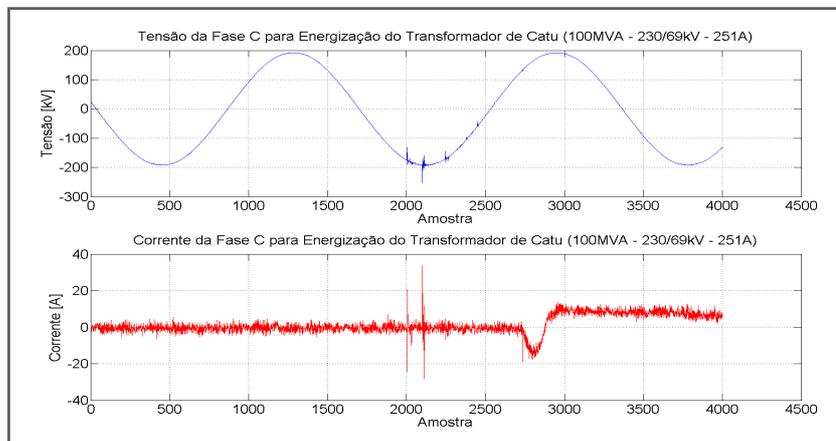


Figura 6-25– Tensão e corrente para a energização do transformador de CTU – fase C
Fonte: Próprio autor

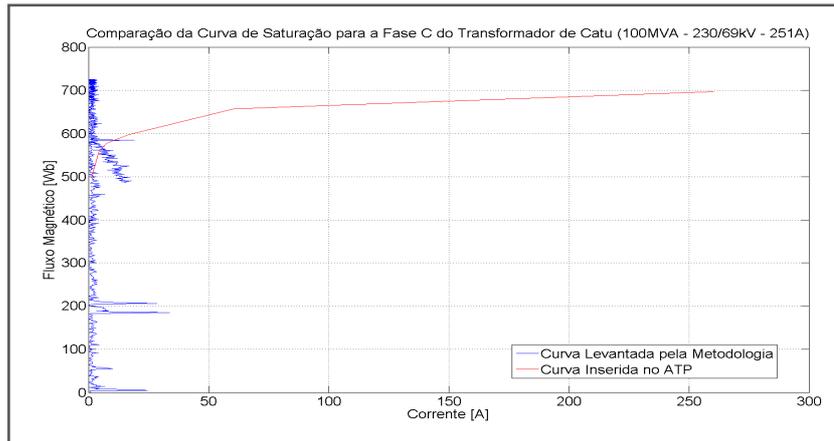


Figura 6-26– Curva de saturação para a energização do transformador de CTU – fase C
 Fonte: Próprio autor

6.2.3 Transformador de 150MVA (230/69kV) DA SE Santa Rita II

O terceiro teste realizado, tomou como base registros oscilográficos da energização em vazio, pelo lado de alta (230kV) de um dos transformadores, atualmente em operação, na SE Santa Rita II (SRD) – Chesf. Neste caso temos outro transformador 230/69kV de dois enrolamentos, porém de capacidade nominal superior aos dos dois casos anteriores.

A Figura 6-27 mostra o diagrama operacional simplificado dos *bays* desse transformador, no qual pode se verificar os pontos de medição da corrente (TC 94T2) e da tensão (TP 84BP). Neste caso, foi utilizado para detecção do instante de energização a medição da tensão do lado de 69kV uma vez que há um TP presente na CT de 60kV do 04T2.

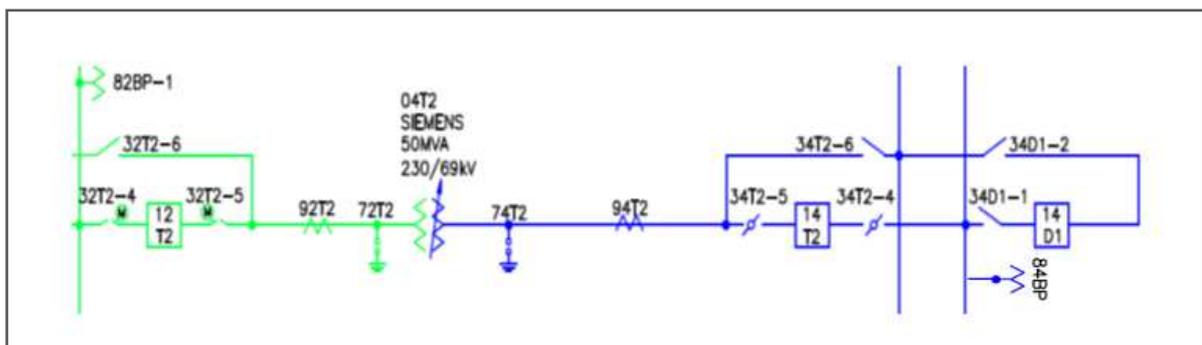


Figura 6-27 - Diagrama operacional simplificado do bay do TR 04TX da SE SRD
 Fonte: Próprio autor

As figuras a seguir mostram os registros da energização do transformador para cada uma das fases e a curva de saturação correspondente.

A Figura 6-28 apresenta o registro da tensão e corrente da fase A. Contudo, houve um ruído na forma de onda da corrente de inrush registrada e a metodologia identificou como sendo esse instante o da energização dessa fase.

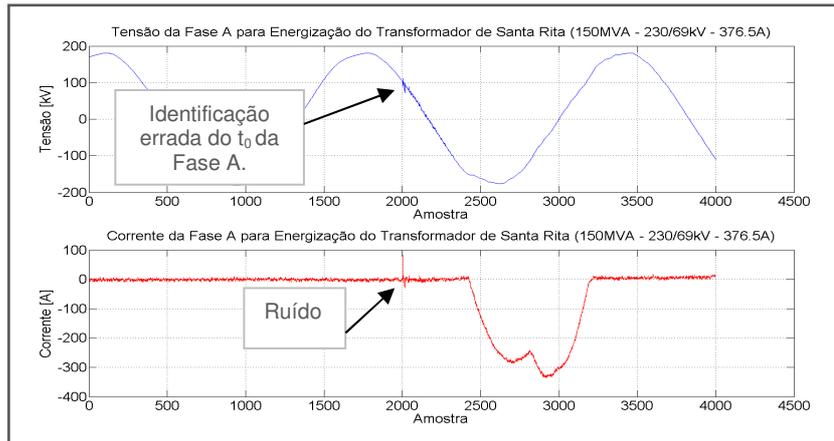


Figura 6-28 – Tensão e Corrente para a Energização do Transformador de SRD – fase A
 Fonte: Próprio autor

A falha na detecção do instante de energização levou a um erro no cálculo da curva de saturação, gerando um resultado inadequado para o levantamento da curva, conforme resultado apresentado na Figura 6-29.

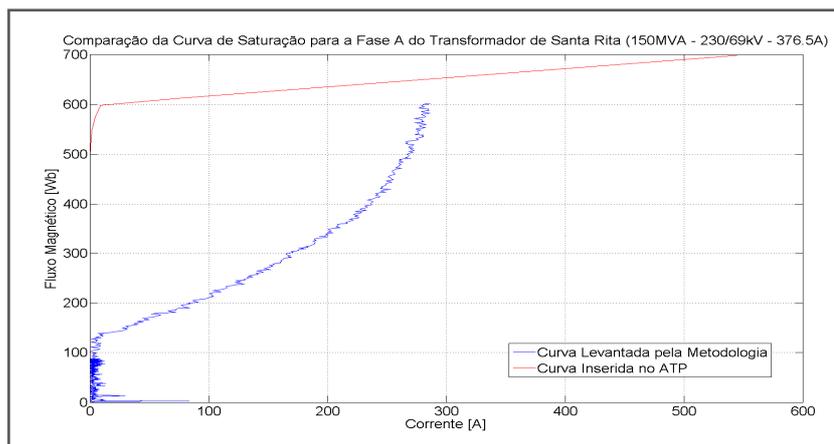


Figura 6-29 - Curva de Saturação para a Energização do Transformador de SRD – fase A
 Fonte: Próprio autor

Já para fase B, mostrada na Figura 6-30, o pico da corrente de inrush foi suficiente para gerar a curva e o instante de chaveamento foi perfeitamente identificado pelo filtro. Observa-se, contudo, que o X_{ac} da curva modelada no ATP pela Chesf apresenta inferior ao medido, indicando que o modelo precisaria ser refinado, adotando-se a curva obtida a partir da medição, enquanto o joelho da curva foi praticamente o mesmo, conforme apresentado na Figura 6-31

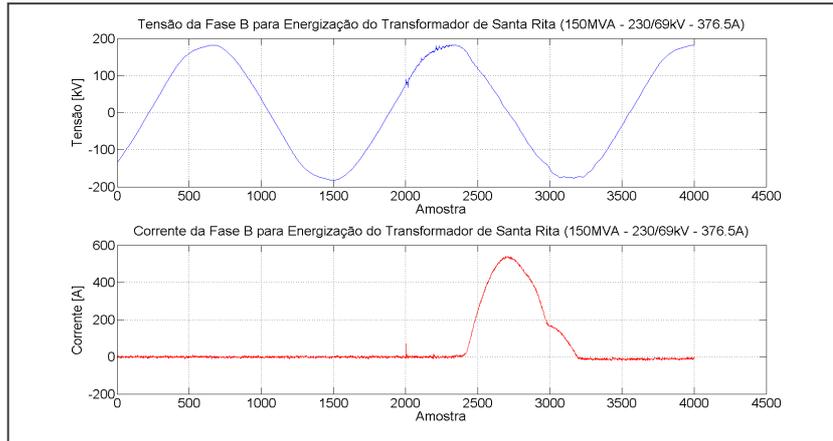


Figura 6-30– Tensão e Corrente para a Energização do Transformador de SRD – fase B
 Fonte: Próprio autor

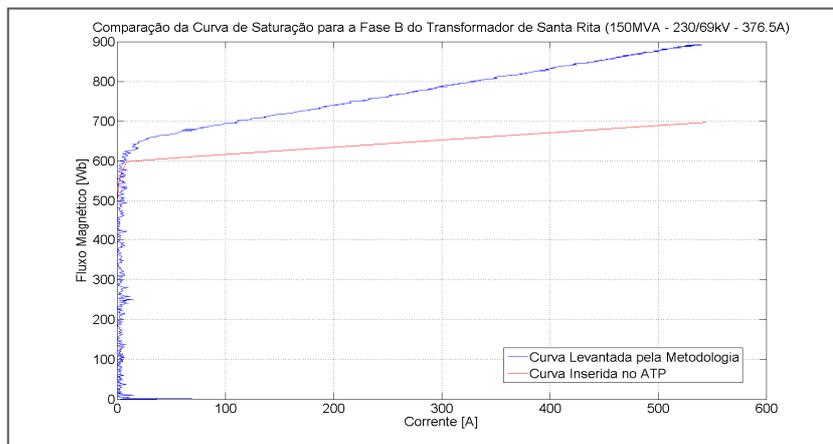


Figura 6-31– Curva de Saturação para a Energização do Transformador de SRD – fase B
 Fonte: Próprio autor

Para fase C, não foi possível obter curva de saturação, provavelmente pelo mesmo erro de medição dado para fase A, conforme mostrado na Figura 6-32 e Figura 6-33.

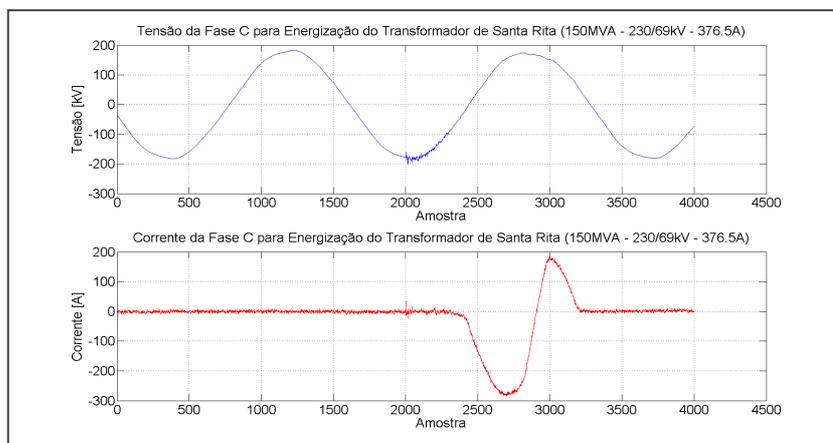


Figura 6-32– Tensão e Corrente para a Energização do Transformador de SRD – fase C
 Fonte: Próprio autor

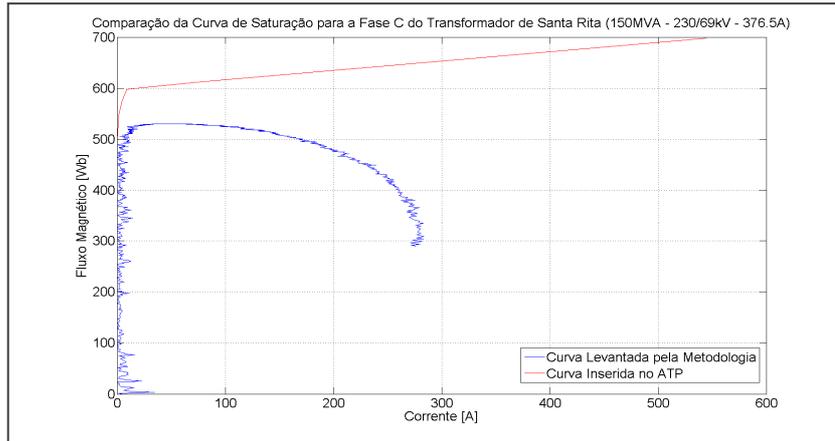


Figura 6-33– Curva de Saturação para a Energização do Transformador de SRD – fase C
Fonte: Próprio autor

CAPÍTULO 7

ENSAIOS DE CAMPO

Neste capítulo serão apresentadas as etapas para aferição e adequações finais do dispositivo desenvolvido através de ensaios em campo, durante a energização de novos transformadores em subestações da Chesf.

7. Ensaios de Campo

Neste capítulo serão apresentadas as etapas para aferição e adequações finais do dispositivo desenvolvido, tanto da ferramenta computacional, quanto do módulo de medição as quais foram realizadas através de ensaios em campo, durante a energização de novos transformadores incorporados em quatro subestações da Chesf.

As tensões e correntes de energização foram medidas pelo módulo de medição Saturômetro ainda em formato de protótipo, conforme fotografias mostradas na Figura 7-1.

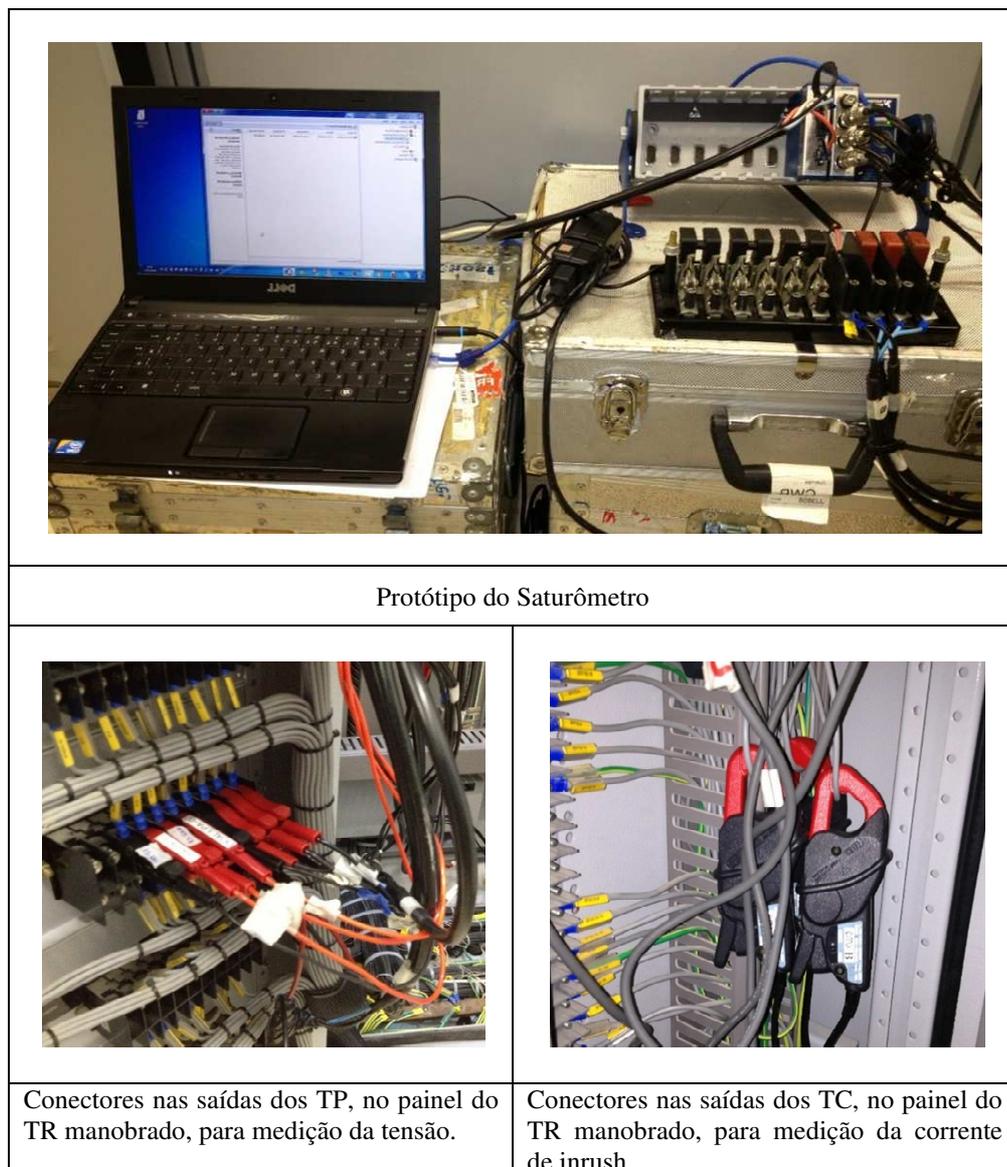


Figura 7-1 - Detalhe do protótipo do Saturômetro montado para medição nas subestações

Fonte: Próprio autor

Essas medições tiveram o objetivo de testar o módulo de medição e fazer os ajustes e refinamentos necessários tanto neste módulo quanto no algoritmo desenvolvido. Esses ensaios foram realizados nas subestações de Aquiraz II, Pici II, Sobral II e Igaporã II; onde foi possível realizar o levantamento das características de magnetização dos transformadores monitorados em cada uma das subestações, conforme a seguir.

7.1 Ensaios na SE Aquiraz II

Os ensaios foram realizados na SE Aquiraz II (AQD) localizada no município de Aquiraz no Ceará; com o intuito de se obter a curva de magnetização dos transformadores 04T1, 04T2 e 04T3 durante sua energização em vazio através do respectivo disjuntor de alta tensão. A Figura 7-2 apresenta o diagrama operacional dos setores de 230kV e 69kV dessa subestação, mostrando a topologia da subestação na época desses ensaios.

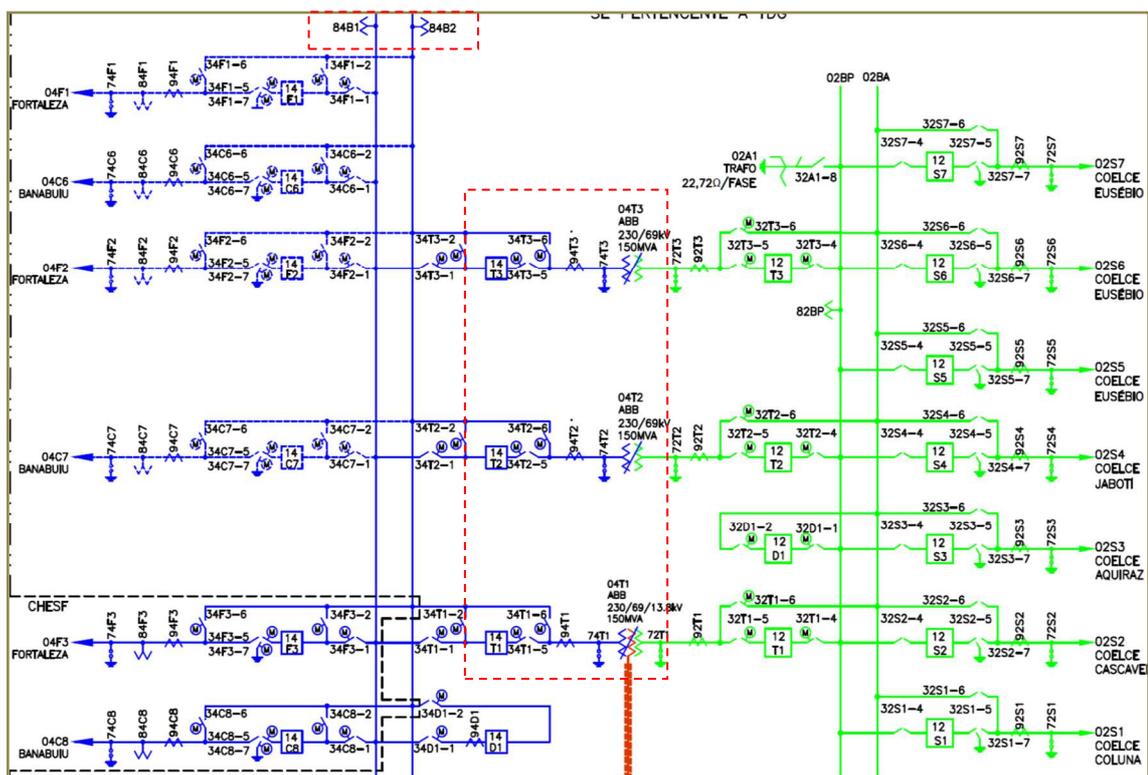


Figura 7-2 – Diagrama operacional da SE Aquiraz II

Fonte: Próprio autor

Conforme pode ser verificado, nesta subestação não há TP instalado nas CT de alta ou de baixa de seus transformadores, existindo para medição dos sinais de tensão TP no barramento de 230kV. Desta forma, a medição das tensões transitórias durante a energização dos transformadores 04T1, 04T2 e 04T3 foram realizadas a partir do TP de barra (84B1). A ausência de TP nas respectivas CT, não torna possível a medição da tensão de desenergização

desses transformadores, inviabilizando o cálculo do fluxo residual através do monitoramento da desenergização.

Em cada CT de 230kV há TC para medição dos sinais das correntes que alimentam esses transformadores, de forma que a medição das correntes de inrush dos transformadores 04T1, 04T2 e 04T3 foram realizadas através dos TC 94T1, 94T2 e 94T3, respectivamente. A posição operacional desses equipamentos está mostrada no diagrama da Figura 7-2

7.1.1 Dados dos transformadores da SE Aquiraz II

Os transformadores da SE Aquiraz são unidades trifásicas de 150MVA de fabricação ABB. A Figura 7-3 mostra o registro fotográfico desses transformadores no pátio da subestação e na Tabela 7-1 são apresentados os dados de placa de cada um dos transformadores ensaiados nessa subestação.



Figura 7-3 – Fotografia dos Transformadores da SE Aquiraz II

Fonte: Próprio autor

Tabela 7-1: Características elétricas dos transformadores da SE Aquiraz II

Fabricante	Posição Operacional	Potência (MVA)	Tensões Terminais (kV)	Ligações Terminais	Impedância dos enrolamentos (%) ($S_{base} = 150MVA$)
ABB	04T1	150	230/69/13,8	Y-D-Y	XAM = 13,90 XAB = 27,12 XBM = 47,20
	04T2	150	230/69	Y-D	XAB = 13,93
	04T3	150	230/69	Y-D	XAB = 13,93

7.1.2 Resultados das medições na SE Aquiraz II

Nesta seção serão apresentados os resultados do monitoramento da energização dos transformadores referentes 04T1 e 04T2 da SE de Aquiraz II, bem como as curvas de saturação levantadas para cada transformador pela metodologia apresentada no capítulo 4. Os sinais de corrente monitorados durante a energização do transformador 04T3 não foram obtidos de forma satisfatória com o Saturômetro. Essa falha foi atribuída a má conexão.

7.1.2.1 Medições do Transformador 04T1- SE Aquiraz II

Na Figura 7-4 são apresentados as formas de onda das tensões no barramento de 230 kV e das correntes de inrush, registradas durante a energização do transformador 04T1 da SE Aquiraz II, onde a fase B foi a que apresentou maior amplitude (870A – 1,6pu), como também melhor resultado da curva de saturação quando comparada as das demais fases. Desta forma será mostrado a seguir o resultado obtido a partir da fase B.

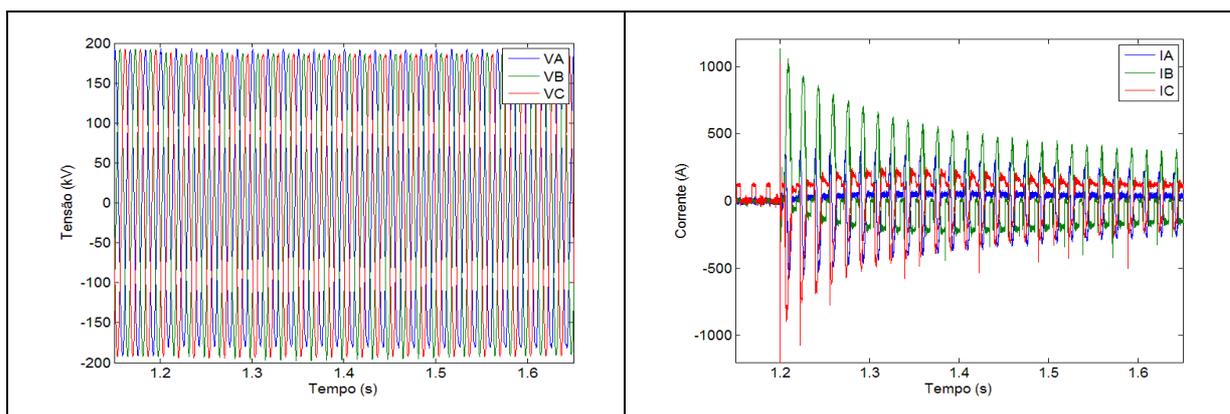


Figura 7-4 –Tensão f-t da barra de 230kV e corrente de inrush no TR 04T1 da SE AQD.

Fonte: Próprio autor

A Figura 7-5 apresenta a forma de onda da tensão e corrente da fase B e a curva de saturação obtida a partir dessas grandezas.

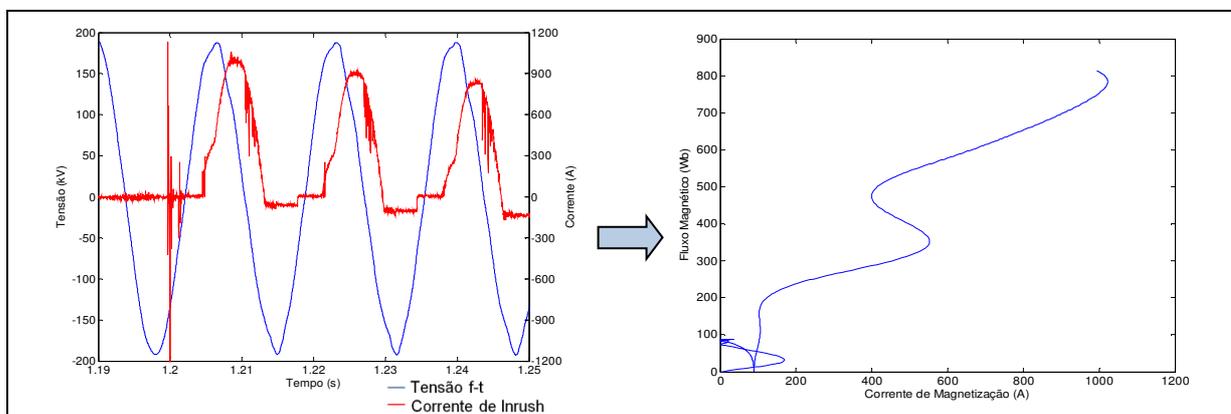


Figura 7-5 – Tensão, corrente de inrush - fase B e curva de saturação obtida para o 04T1 da SE AQD.

Fonte: Próprio autor

Pode-se verificar na Figura 7-5, que a curva obtida pelo Saturômetro não possui o formato esperado. Uma das causas que pode ser apontada é o fato da corrente de inrush registrada ser bastante ruidosa, observando um “espúrio” antes do primeiro pico de corrente. Como havia dados disponíveis da medição dessas correntes através de oscilógrafo da Chesf, foram usados esses registros para aplicar a metodologia e obtenção da curva de saturação.

A Figura 7-6 apresenta um comparativo da corrente de inrush da fase B registrada pelo oscilógrafo da Chesf e pelo Saturômetro. Nota-se que não houve diferenças consideráveis em amplitude e fase, inclusive com relação ao sinal ruidoso. O registro feito pelo do Saturômetro registrou um pico maior nos primeiros ciclos o que seria mais favorável para obter a curva de saturação, porém certamente o algoritmo considerou como primeiro ciclo o espúrio registrado.

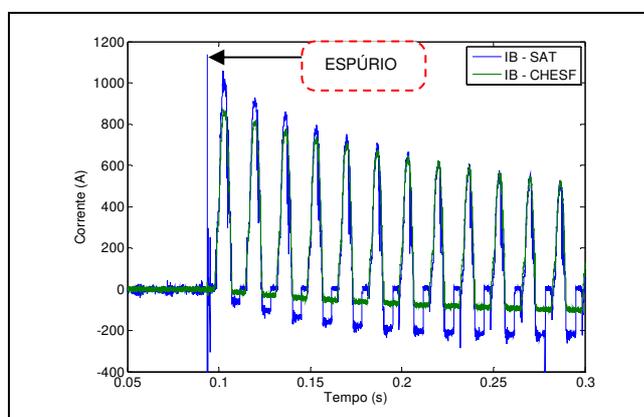


Figura 7-6 – Comparação entre a forma de onda da corrente de inrush registrada pelo Saturômetro e pelo oscilo Chesf – 04T1 da SE AQD

Fonte: Próprio autor

Na Figura 7-7, a curva de saturação para o transformador 04T1 da subestação de Aquiraz gerada a partir dos dados do oscilógrafo da Chesf é apresentada em azul. Uma vez que não foi possível medir o fluxo residual no ensaio de campo realizado, a curva final, em preto, foi modelada no ATP utilizando os pontos da parte linear e o joelho da curva fornecida pelo fabricante (curva vermelha). A partir daí, é determinada uma reta com o mesmo coeficiente angular da curva determinada pelas medições em campo (curva azul).

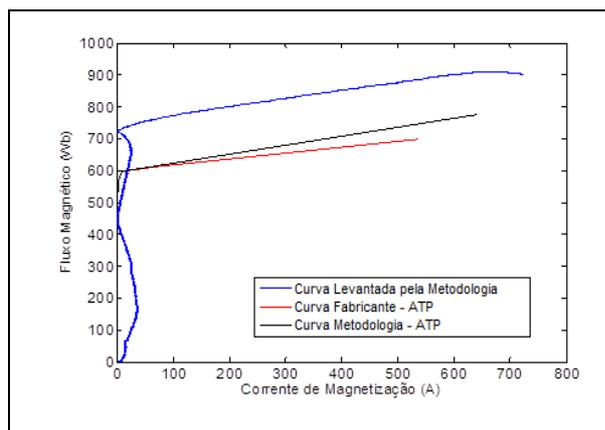


Figura 7-7 – Curva de saturação do transformador 04T1 da SE AQD

Fonte: Próprio autor

7.1.2.2 Medições do Transformador 04T2- SE Aquiraz

Na Figura 7-8 são apresentados os registros das tensões no barramento de 230 kV e das correntes de inrush, durante a energização do transformador 04T2 da SE Aquiraz II. A fase C foi a que apresentou maior amplitude (835A – 2,2pu), sendo esta utilizada para o levantamento da curva de saturação dessa unidade.

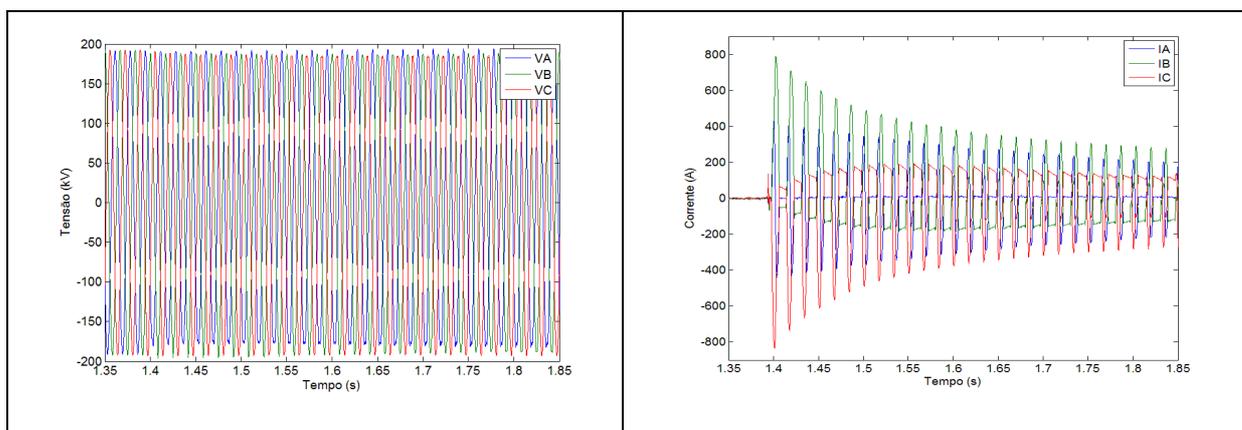


Figura 7-8 – Tensão f-t da barra de 230kV e corrente de inrush no TR 04T2 da SE AQD

Fonte: Próprio autor

A Figura 7-9 apresenta a forma de onda da tensão e corrente da fase C e a curva de saturação obtida a partir dessas grandezas.

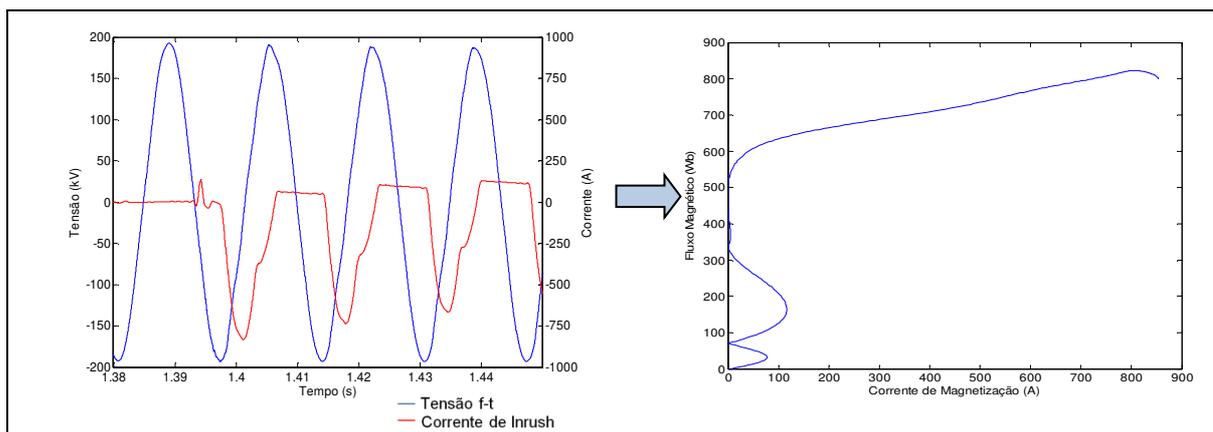


Figura 7-9 – Tensão, corrente de inrush - fase C e curva de saturação obtida para o 04T2 da SE AQD

Fonte: Próprio autor

A partir da curva de saturação apresentada na Figura 7-9 e da aplicação da metodologia, conforme foi feito para o 04T1, foi gerada a curva de saturação final para o transformador 04T2 de Aquiraz, mostrada na Figura 7-10 (curva preta).

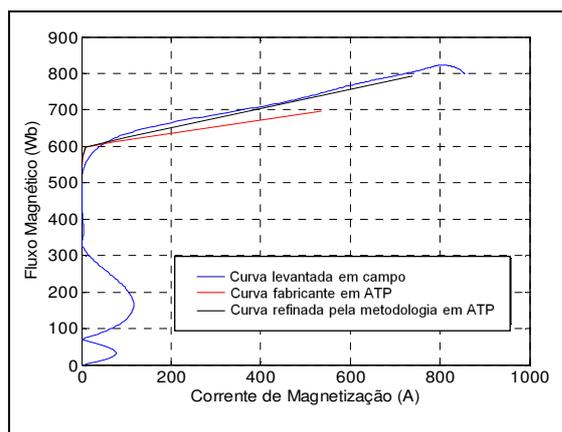


Figura 7-10 – Curva de saturação do transformador 04T2 da SE Aquiraz – Final

Fonte: Próprio autor

Neste caso observa-se que apesar de não ter havido medição de fluxo residual para correção do joelho, o valor do joelho medido coincidiu com o fornecido pelo fabricante o que possivelmente leva a crer que nesta fase o fluxo residual era nulo quando da energização desse transformador.

7.2 Ensaios na SE Pici II

Os ensaios foram realizados na SE Pici II (PCD), localizada em Fortaleza no Ceará, com o intuito de se obter a curva de magnetização do transformador 04T4 durante sua energização em vazio através do respectivo disjuntor de alta tensão.

A Figura 7-11 apresenta o diagrama operacional dos setores de 230kV e 69kV da SE Pici II, mostrando a topologia da subestação na época desses ensaios.

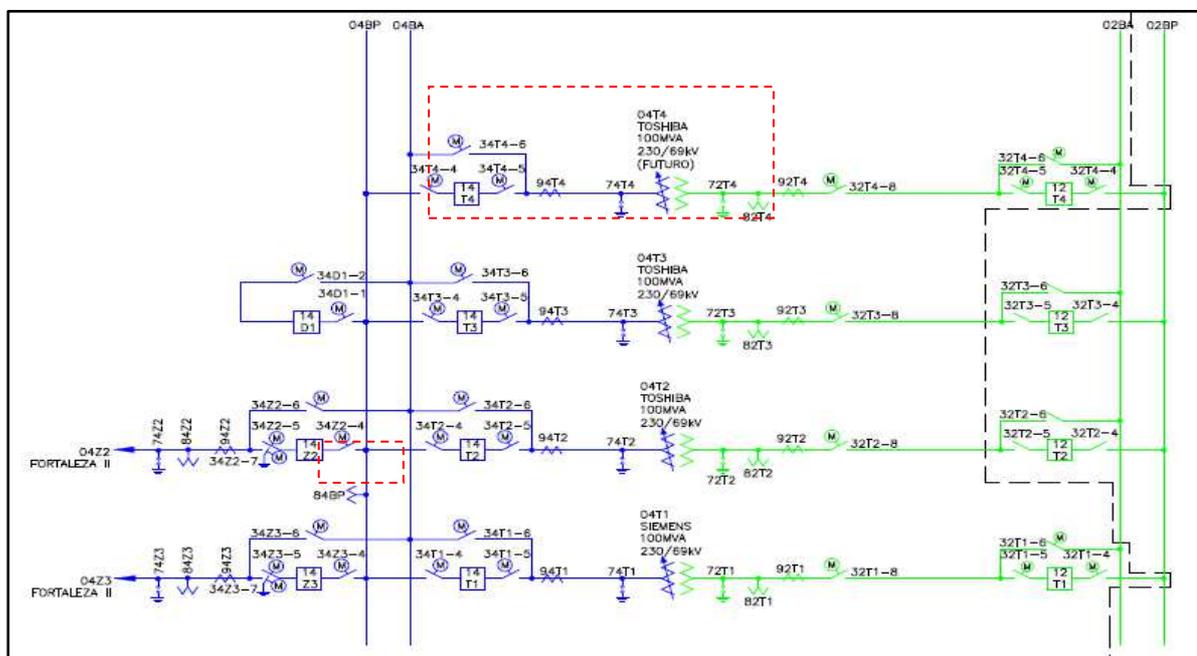


Figura 7-11 – Diagrama operacional da SE Pici II

Fonte: Próprio autor

Nesta subestação não há TP instalado nas CT de alta dos transformadores. Desta forma a medição das tensões transitórias durante a energização do transformador 04T4 foi realizada a partir do TP de barra (84BP). Entretanto, nas CT de baixa dos transformadores da SE Pici existem TP para a medição dos sinais de tensão, tornando possível a monitoração das tensões durante a desenergização do transformador 04T4 através de seu secundário, a partir do TP 82T4. Como o Saturômetro, na época dessa medição não dispunha outros cartões para aquisição de sinais de tensão, a medição no lado de 69 kV foi realizada com um oscilógrafo da Chesf. Para a medição dos sinais de corrente há a possibilidade da utilização de TC nas CT de 230 kV que alimentam os transformadores, de forma que a medição das correntes de inrush do transformador 04T4 foi realizada através dos TC 94T4. A posição operacional desses equipamentos está mostrada no diagrama da Figura 7-11.

7.2.1 Dados do transformador 04T4 da SE PICI II

O transformador 04T4 da SE Pici II é uma unidade trifásicas de 100MVA de fabricação ABB. A Figura 7-12 mostra o registro fotográfico desse transformador no pátio da subestação e na Tabela 7-2 os dados de placa desse transformador.

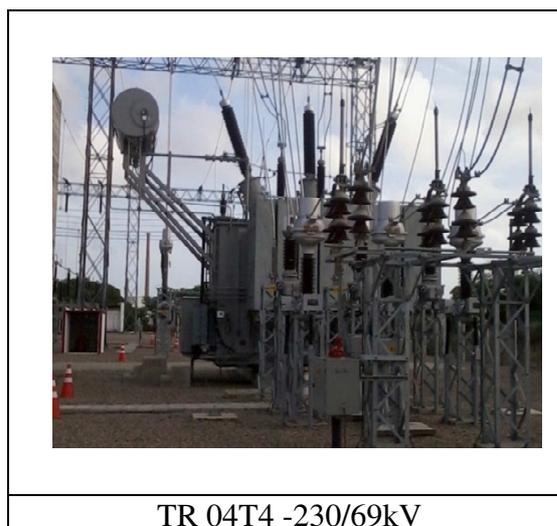


Figura 7-12 – Fotografia do Transformador 04T4 da SE Pici II

Tabela 7-2 - Características elétricas do transformador 04T4 da SE Pici II

Fabricante	Posição Operacional	Potência (MVA)	Tensões Terminais (kV)	Ligações Terminais	Impedância dos enrolamentos (%) ($S_{base} = 100MVA$)
ABB	04T4	100	230/69	Y-D	XAB = 13,09

7.2.2 Resultados dos Ensaio na SE Pici II

Nesta seção serão apresentados os resultados do monitoramento da energização do transformador 04T4 da SE de Pici II, bem como a curva de saturação levantada pela metodologia apresentada no capítulo 4.

Para se medir o fluxo residual é necessário realizar uma primeira energização, uma desenergização seguida de uma reenergização. Contudo, a desenergização não foi registrada, pois havia um problema na ligação dos TP de 69 kV (82T4) associados ao transformador 04T4, não visto no comissionamento o qual foi sanado, mas como não houve registro da tensão de desenergização não foi possível medição do fluxo residual também para este caso.

7.2.2.1 Medições no Transformador 04T4- SE Pici II

Na Figura 7-13 são apresentadas as formas de onda das tensões no barramento de 230 kV e as correntes de inrush registradas durante a segunda energização do transformador 04T4 da SE Pici, onde a fase B foi a que apresentou maior corrente de inrush (1311 A – 5.22 pu). Contudo, como a metodologia permite levantar a curva para as três fases para verificar qual deu o melhor resultado, neste caso a fase C, que foi a que teve o menor valor de pico da corrente de inrush, foi a que apresentou melhor resultado na determinação da curva de saturação.

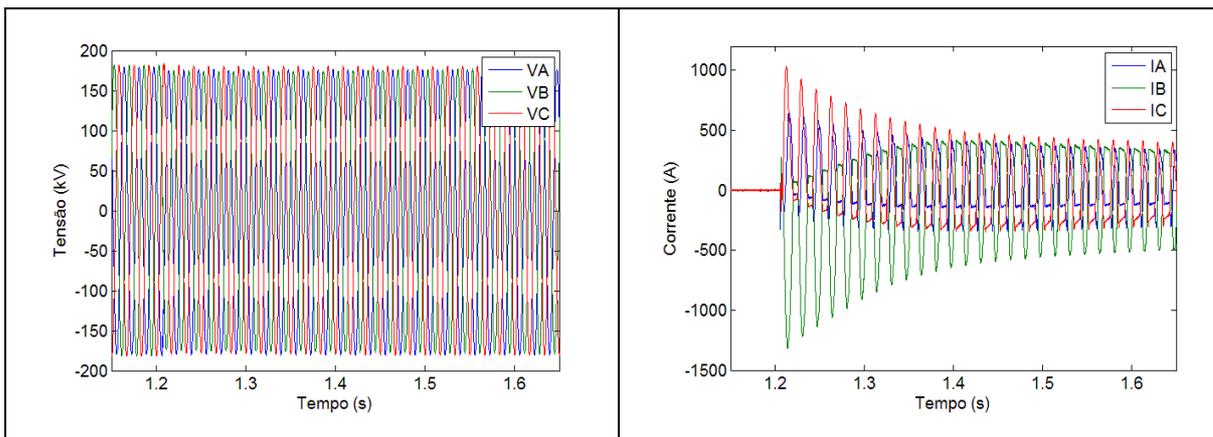


Figura 7-13 – Tensão f-t da barra de 230kV e corrente de inrush no TR do TR 04T4 da SE Pici

Fonte: Próprio autor

A Figura 7-14 apresenta a forma de onda da tensão e corrente da fase C e a curva de saturação obtida a partir dessas grandezas.

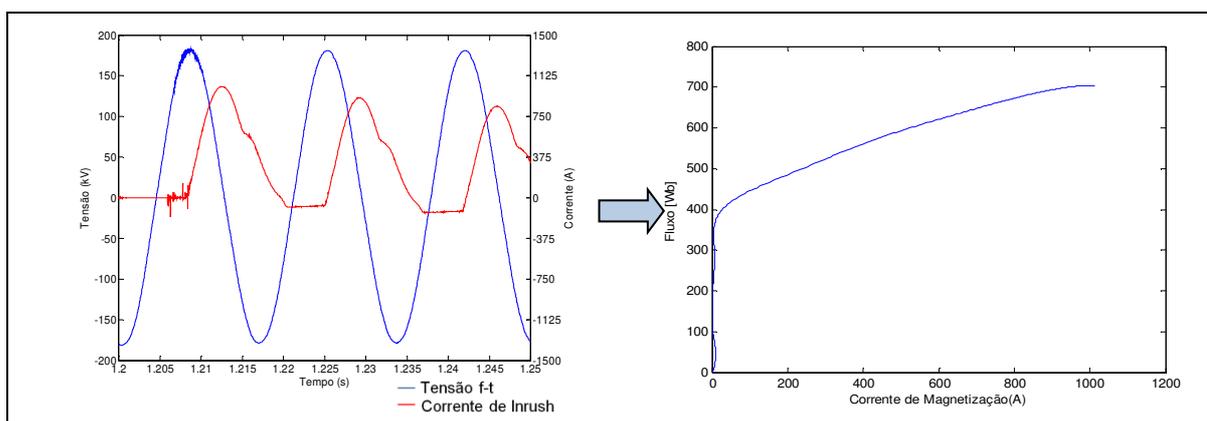


Figura 7-14 – Tensão, corrente de inrush - fase B e curva de saturação obtida – 04T4 da SE Pici

Fonte: Próprio autor

A partir da curva de saturação apresentada na Figura 7-14 e aplicando a metodologia descrita no item 4.6, foi gerada a curva de saturação final para o transformador 04T4 da SE Pici II, mostrada na Figura 7-15 na cor preta. Da mesma forma que no caso anterior, por não haver medição do fluxo residual, foi utilizada a região linear na curva fornecida pelo fabricante (Curva vermelha) até o “joelho” e mantendo o X_{ac} da curva determinada pelas medições (Curva azul).

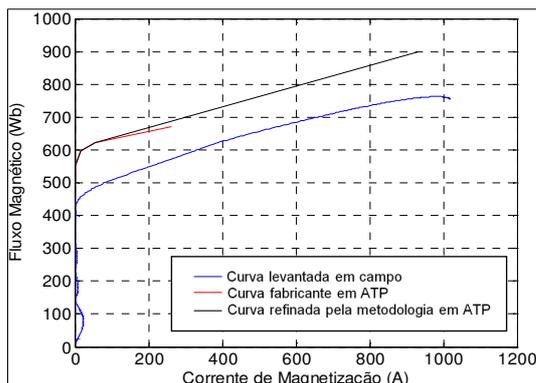


Figura 7-15 – Curva de saturação do transformador 04T4 da SE Pici II

Fonte: Próprio autor

7.3 Ensaios na SE Igaporã II

Os ensaios foram realizados na SE Igaporã II (IGD), localizada no município de Igaporã na Bahia, com o intuito de se obter a curva de magnetização dos transformadores 04T1 e 04T2 durante energização em vazio dessas unidades através do respectivo disjuntor de alta tensão. A Figura 7-16 apresenta o diagrama operacional dos setores de 230 kV, 69 kV e 13.8 kV da SE Igaporã II, mostrando a topologia da subestação na época desses ensaios.

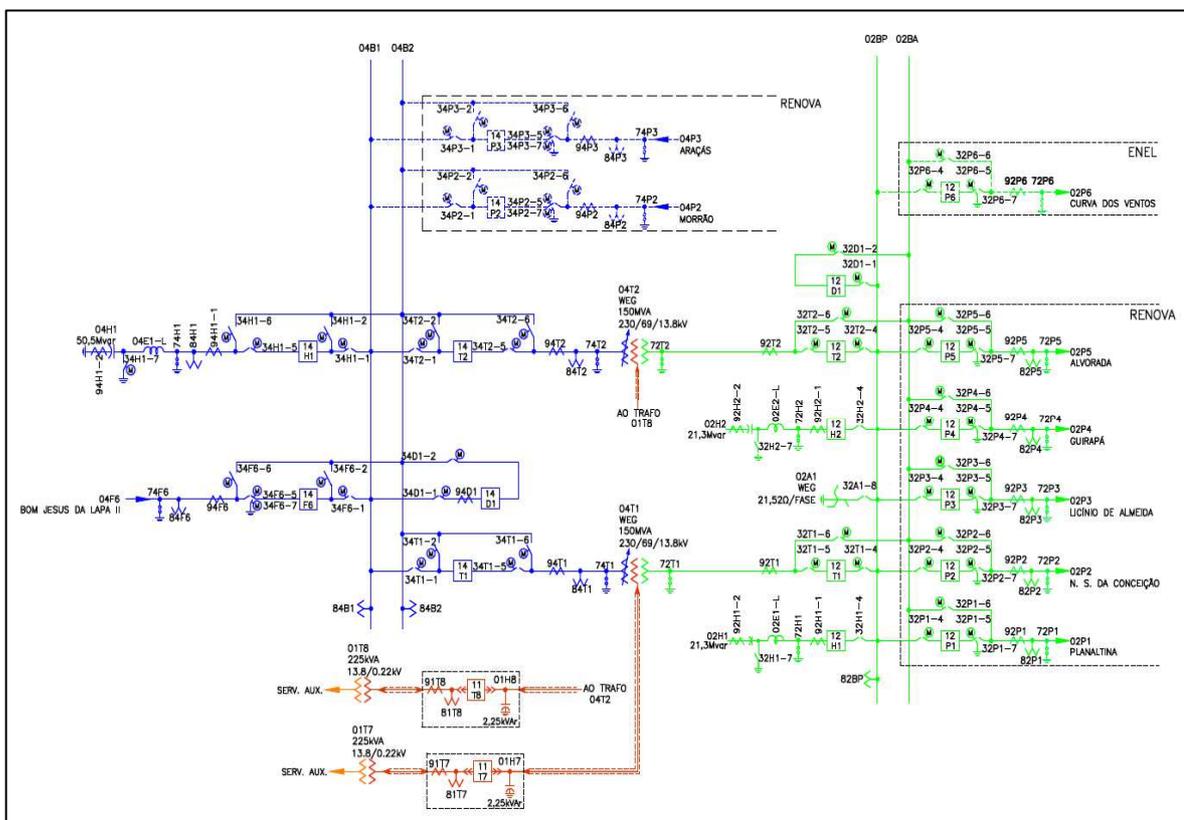


Figura 7-16 – Diagrama operacional da SE Igaporã II

Fonte: Próprio autor

Diferentemente dos outros casos apresentados ao longo deste relatório, a subestação de Igaporã apresenta TP instalados na CT de alta dos transformadores dessa subestação. Esta disponibilidade permitiu a medição das tensões trifásicas de energização e desenergização no lado de 230 kV. Essa topologia além de facilitar a detecção do instante exato de energização do transformador, possibilita a medição do fluxo residual. Os TP utilizados para as medições de tensão dos transformadores 04T1 e 04T2 foram, respectivamente, o TP 84T1 e 84T2. Para a medição das correntes de inrush desses transformadores, foram utilizados, respectivamente, os TC 94T1 e 94T2. A posição operacional desses equipamentos está mostrada no diagrama da Figura 7-16.

7.3.1 Dados dos transformadores da SE Igaporã II

Os transformadores da SE Igaporã II são unidades trifásicas de 150MVA de fabricação WEG. Na Tabela 7-3 estão apresentados os dados de placa desses transformadores. Neste caso, não houve registro fotográfico.

Tabela 7-3: Características elétricas dos transformadores da SE Igaporã II

Fabricante	Posição Operacional	Potência (MVA)	Tensões Terminais (kV)	Ligações Terminais	Impedância dos enrolamentos (%) ($S_{base} = 100\text{MVA}$)
WEG	04T1 / 04T2	150	230/69/13,8	Y-D-Y	XAM = 13,11 XAB = 57,69 XBM = 43,84

7.3.2 Resultados dos Ensaio na SE Igaporã II

Durante as energizações dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE Igaporã, foram monitorados os eventos referentes à desenergização e subsequente energização de cada um dos transformadores. Desta forma, vislumbra-se validar a metodologia desenvolvida no presente projeto também para os casos em que é possível calcular o fluxo residual dos transformadores, sendo possível aplicar a metodologia completa apresentada no Capítulo 4.

7.3.2.1 Medições no Transformador 04T1 - SE Igaporã II

Na Figura 7-17 é apresentado o registro da forma de onda das tensões no lado de 230 kV do transformador 04T1, durante sua desenergização e os valores do fluxo residual calculados para cada fase, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4, item 4.4.

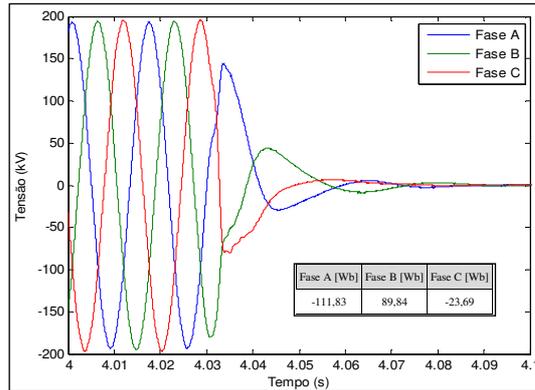


Figura 7-17 – Tensões na CT de 230 kV do TR 14T1 durante sua desenergização.

Fonte: Próprio autor

Nas Figura 7-18 são apresentados os registros das tensões na CT de 230 kV e das correntes de inrush do transformador 14T1 da SE de Igaporã II, durante sua energização. Verifica-se que a fase A foi a que apresentou maior valor de pico (1090 A – 2,89 pu) e a que melhor representou a curva de saturação desse transformador.

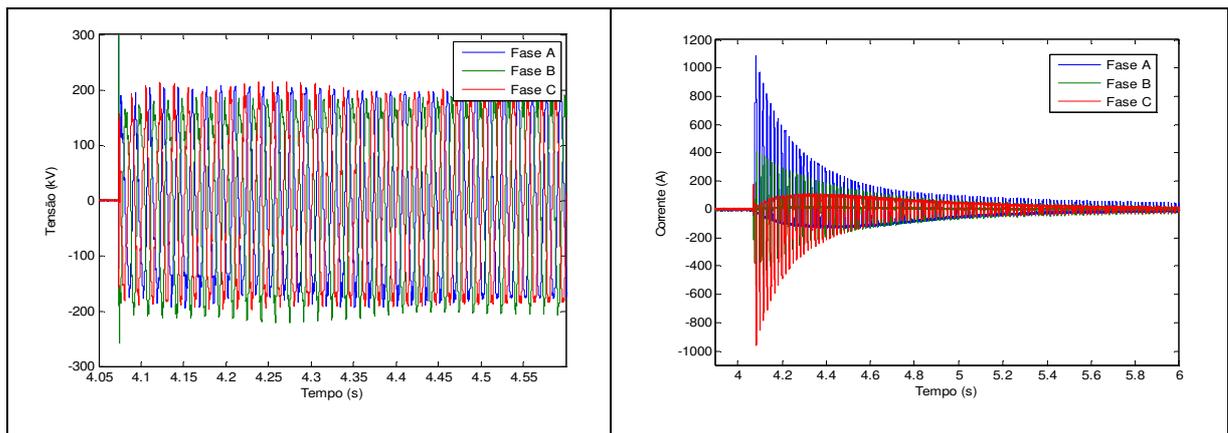


Figura 7-18 –Tensão na CT de 230 kV e corrente de inrush do TR 14T1 da SE IGD

Fonte: Próprio autor

A Figura 7-19 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de energização da fase A e a curva de saturação obtida a partir dessas grandezas, sem considerar a influência do fluxo residual no cálculo da curva, onde pode se observar que o joelho fica muito longe daquele informado pelo fabricante desse transformador.

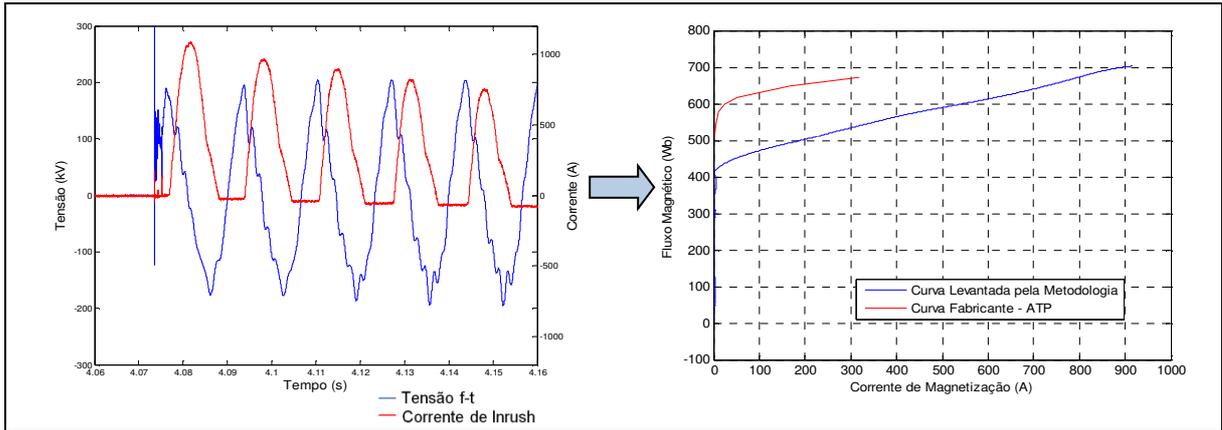


Figura 7-19 – Tensão, corrente de inrush - fase A e curva de saturação obtida do TR 04T1 - SE IGD sem considerar o fluxo residual

Fonte: Próprio autor

A Figura 7-19 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de energização da fase A e a forma de onda da tensão medida no transformador durante sua desenergização. A curva de saturação obtida a partir dessas grandezas tem um joelho mais próximo do informado pelo fabricante devido à correção do cálculo do fluxo magnético a partir do conhecimento do fluxo residual existente no transformador antes da energização considerada no cálculo da curva.

Para esse caso, foi possível aferir tanto o X_{ac} quanto o joelho informado pelo fabricante, onde se observa diferenças razoáveis dessas duas grandezas podendo impactar nos resultados dos estudos pré-operacionais desenvolvidos pelo Chesf para a entrada desse transformador. Essa questão será abordada no próximo capítulo.

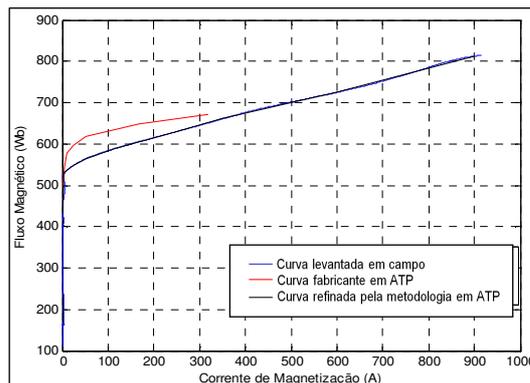


Figura 7-20 – Curva final de saturação do TR 04T1 - SE Igaporã

Fonte: Próprio autor

7.3.2.2 Medições no Transformador 04T2- SE Igaporã II

Na Figura 7-21 é apresentado o registro das tensões na CT de 230 kV do transformador 04T2, durante sua desenergização. Como também os valores do fluxo residual calculados para cada fase.

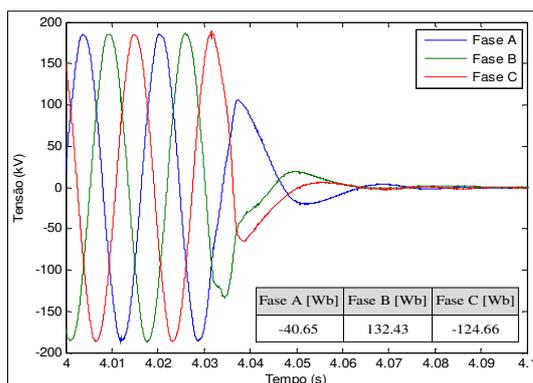


Figura 7-21 – Tensões na CT de 230 kV do TR 04T2 durante sua desenergização.

Fonte: Próprio autor

Na Figura 7-22 são apresentados os registros das tensões na CT de 230 kV e das correntes de inrush do transformador 04T2 da SE de Igaporã, durante sua energização.

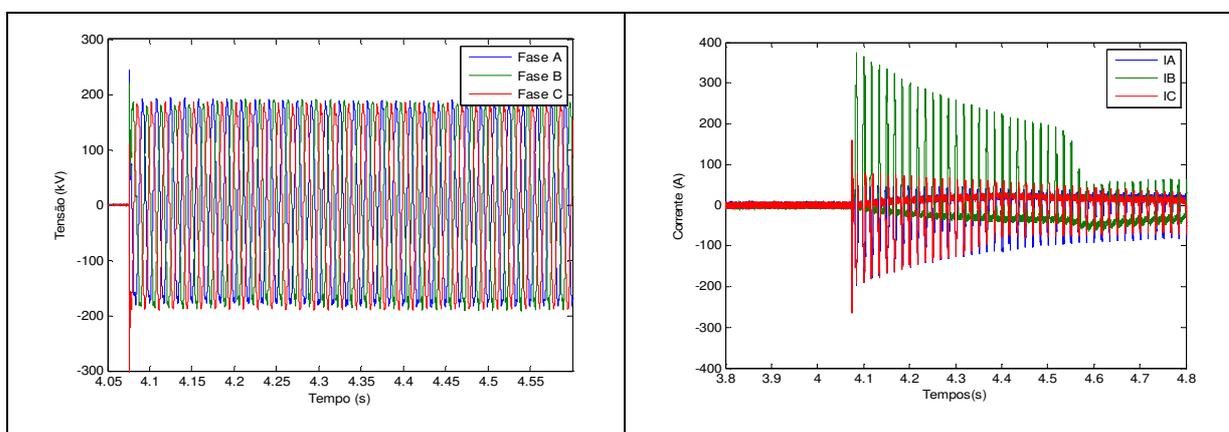


Figura 7-22 – Tensão na CT de 230 kV e corrente de inrush do TR 04T2 da SE IGD

Fonte: Próprio autor

Verifica-se que a fase B foi a que apresentou maior valor de pico (376 A – 1 pu), mas não definiu um bom resultado para a curva de saturação. Dentre as três fases a que gerou um resultado mais consistente, foi a fase C.

A Figura 7-23 apresenta a forma de onda da tensão e corrente da fase C registrada durante a energização do transformador 04T2 e a curva de saturação obtida a partir desses registros.

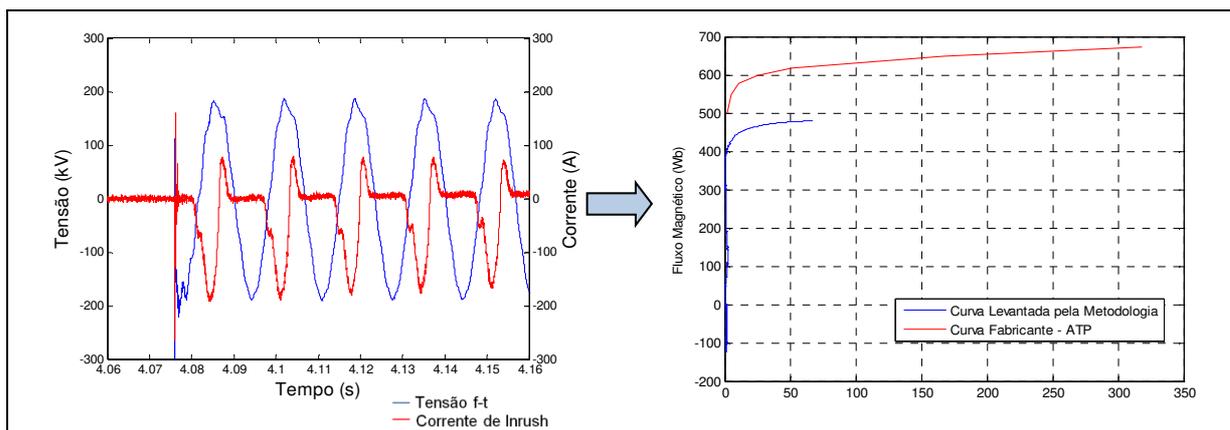


Figura 7-23 – Tensão, corrente de inrush - fase C e curva de saturação obtida do TR 14T2 - SE IGD, sem considerar o fluxo residual, confrontada com a curva do fabricante.

Fonte: Próprio autor

A partir da curva de saturação, em azul, apresentada na Figura 7-23 foi corrigido o fluxo, subtraindo-se o fluxo residual medido, de forma a se obter a curva de saturação final para o transformador 04T2 da SE Igaporã, mostrada na Figura 7-24.

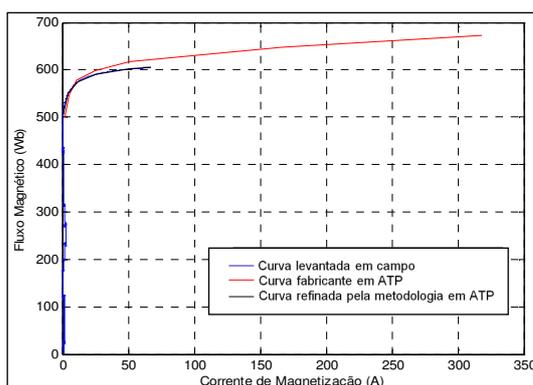


Figura 7-24 – Curva final de saturação do TR 04T2 - SE Igaporã

Comparando-se os resultados obtidos para os transformadores 04T1 e 04T2 da subestação de Igaporã II, apesar dos dois transformadores possuírem as mesmas características de fabricação, observa-se que o joelho da curva referente ao transformador 04T1 difere do joelho encontrado para o 04T2, sendo esse último coincidente com o informado pelo fabricante.

CAPÍTULO 8

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E VALIDAÇÃO DO MODELO EM ATP.

Neste capítulo serão apresentados os impactos nos resultados de estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos de energização de transformadores modificando os parâmetros das curvas de saturação por aqueles obtidos através da aplicação da metodologia desenvolvidas nesse trabalho, como também sua validação final.

8. Aplicação da Metodologia e Validação do Modelo em ATP

Neste capítulo serão apresentados os impactos nos resultados de estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos de energização de transformadores modificando os parâmetros das curvas de saturação por aqueles obtidos através da aplicação da metodologia desenvolvidas nesse trabalho, como também sua validação final.

Para validação final da metodologia, é feita a comparação do comportamento das correntes de inrush resultantes das simulações usando a modelagem da curva de saturação do transformador manobrado a partir do Saturômetro com resultados de medição em campo da energização desse equipamento.

Com o intuito de verificar se as curvas fornecidas pelo fabricante apresentam resultados satisfatórios para os estudos de manobra em ATP, fez-se a mesma comparação dos resultados de simulação usando a modelagem da curva de saturação do transformador manobrado dada pelo fabricante do respectivo transformador com os registros de campo.

8.1 Obtenção dos Resultados

Os estudos de transitórios eletromagnéticos realizados na fase pré-operacional vão definir ajustes de proteção e recomendações operativas para energização e operação de um novo equipamento. No caso de transformadores, as grandezas de interesse são as correntes e tensões transitórias verificadas não só no transformador manobrado como nos demais equipamentos da respectiva subestação e das subestações vizinhas, cujo comportamento transitório de cada uma dessas grandezas é influenciado diretamente, além de outros parâmetros, pela característica da curva de saturação do transformador manobrado.

Havendo modificações na representação da região não linear dessa curva, ou seja, no seu joelho ou Xac, o comportamento de cada grandeza monitorada nos estudos sofre modificações, podendo levar a necessidade de reavaliação dos resultados. Dentro dessas grandezas está a corrente de inrush do transformador manobrado, onde se é avaliado o pico máximo e o amortecimento dessa corrente a fim de se ajustar a proteção de sobrecorrente associada como também verificar a suportabilidade desse equipamento à corrente observada.

Diante disto para verificar o impacto nos resultados dos estudos pré-operacionais desenvolvidos pela Chesf para os transformadores apresentados no capítulo 7, diante da nova curva de saturação obtida após sua energização, foi simulada, em ATP, a energização de cada

um desses transformadores para obtenção das correntes de inrush utilizando no modelo a curva de saturação levantadas pela metodologia proposta, partindo dos mesmos casos base utilizados nos estudos pré-operacionais desses equipamentos. De posse dos resultados, a corrente obtida é comparada com aquela obtida nos estudos pré-operacionais, nos quais foi utilizada no modelo do transformador manobrado a curva de magnetização disponibilizada pelo fabricante.

8.1.1 Subestação Aquiraz II

No capítulo 7, na Figura 7-7 é mostrada a curva de saturação definida a partir dos parâmetros declarados pelo fabricante e a definida pelo Saturômetro para o transformador 04T1 da SE Aquiraz II. A Tabela 8-1 apresenta um comparativo entre o Joelho e o Xac dessas curvas.

Tabela 8-1: Comparativo das curvas do fabricante e do Saturômetro – TR 04T1 - SE Aquiraz II

TR 04T1	Fabricante	Saturômetro
Joelho (pu)	1,20	1,20
Xac (%)	19,64	32,63

Diante das diferenças encontradas, foram realizadas simulações de energização desse transformador com cada uma dessas curvas modeladas. A Figura 8-1 apresenta as correntes de inrush obtidas.

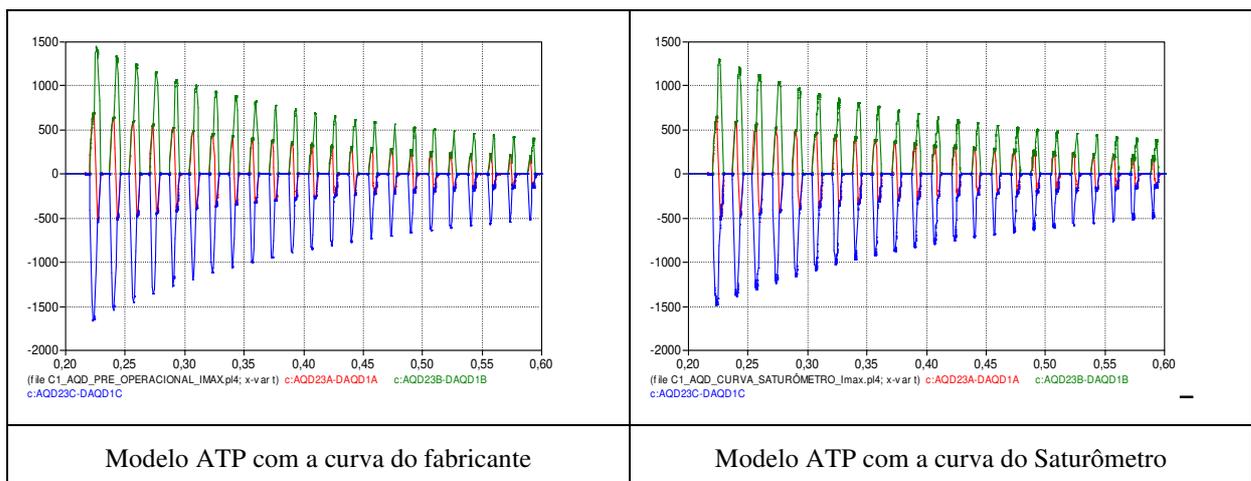


Figura 8-1 – Resultados de simulação: correntes de inrush 04T1 SE Aquiraz II

Fonte: Próprio autor

Pelas formas de onda apresentadas, apesar dos resultados obtidos com a curva do fabricante serem mais conservativo, as diferenças na amplitude e no decaimento de cada uma das fases não são relevantes, não trazendo impacto nas recomendações operativas geradas pelos estudos realizados na fase pré-operacional desse equipamento.

8.1.2 Subestação PICI II

No capítulo anterior, na Figura 7-15 é mostrada a curva de saturação definida a partir dos parâmetros declarados pelo fabricante e a definida pelo Saturômetro para o transformador 04T4 da SE Pici II. A Tabela 8-2 apresenta um comparativo entre o Joelho e o Xac dessas curvas.

Tabela 8-2: Comparativo das curvas do fabricante e do Saturômetro – TR 04T4 - SE Pici II

TR 04T1	Fabricante	Saturômetro
Joelho (pu)	1,25	1,25
Xac (%)	27,25	30,09

Diante das diferenças encontradas, foram realizadas simulações de energização desse transformador com cada uma dessas curvas modeladas. A Figura 8-2 apresenta as correntes de inrush obtidas.

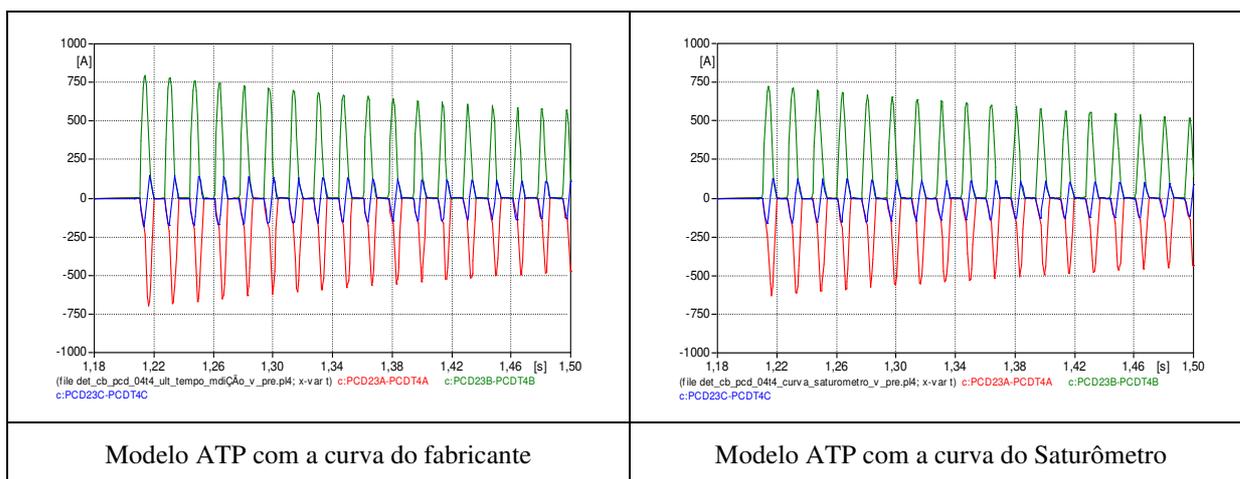


Figura 8-2 – Corrente de Inrush – Simulação curva do fabricante – SE PICI II

Fonte: Próprio autor

Da mesma forma que o caso anterior, pelas formas de onda apresentadas, as diferenças na amplitude e no decaimento de cada uma das fases não são relevantes, não trazendo impacto nas recomendações operativas geradas pelos estudos realizados na fase pré-operacional desse equipamento.

Para ambos os casos mostrados acima, fica a necessidade de saber qual curva de saturação representa com mais fidelidade os resultados obtidos em campo, a fim de se decidir qual modelo computacional em ATP do transformador deverá ser utilizado nos estudos da operação. Desta forma será utilizado o caso de estudo de um dos transformadores da SE Igarorã da Chesf para fazer essa verificação.

8.2 Validação do modelo do transformador 04T1 - SE Igarorã II

No capítulo anterior, na Figura 7-20, são mostradas as curvas de saturação definidas com os parâmetros do fabricante e a definida pelo Saturômetro para o transformador 04T1 da SE Igarorã II. A Tabela 8-3 apresenta um comparativo entre o Joelho e o Xac dessas curvas.

Tabela 8-3: Comparativo das curvas do fabricante e do Saturômetro – TR 04T1 - SE Igarorã II

TR 04T1	Fabricante	Saturômetro
Joelho (pu)	1,18	1,10
Xac (%)	35,0	47,0

Da mesma forma que os casos anteriores, a fim de verificar o real impacto das diferenças encontradas e a sensibilidade da resposta do modelo STC do ATP à variação dos valores da curva de magnetização apresentadas, foram realizadas simulações de energização do transformador 04T1 da SE Igarorã II, utilizando os parâmetros magnéticos informados pelo fabricante e os determinados pelo Saturômetro, cujos modelos utilizados estão apresentados na Tabela 8-4.

Tabela 8-4: Modelagem da Curva de Saturação em ATP – SE IGD

TRANSFORMER	1.7040498.14T1IGDA	TRANSFORMER	0.7040433.74T1IGDA
C CORRENTE (A) >> FLUXO (V-S) >		C CORRENTE (A) >> FLUXO (V-S) >	
1.70400008E+00	4.98137515E+02	2.90400000E+00	519.51400
5.33213851E+00	5.47951267E+02	5.33213851E+00	524.05126
1.10406544E+01	5.77839518E+02	1.10406544E+01	530.93951
2.52593408E+01	5.97765018E+02	2.52593408E+01	546.86501
5.14641321E+01	6.17690519E+02	5.14641321E+01	563.29051
1.66652964E+02	6.47578770E+02	116.436000E+00	586.94520
3.18370407E+02	6.72485645E+02	220.120000E+00	615.72100
		350.324000E+00	645.64500
	Fabricante		Medida pelo Saturômetro

No entanto, diferente dos dois casos anteriores, as simulações foram realizadas buscando representar a condição operacional em que o transformador foi energizado em

campo, a fim de se reproduzir as grandezas medidas, possibilitando a comparação dos resultados. Para tanto, a partir do caso base em ATP utilizado nos estudos pré-operacionais desse transformador, foi ajustado os instantes de chaveamento e a tensão pré-manobra utilizada na energização em campo. A Figura 8-3 apresenta as correntes de inrush obtidas.

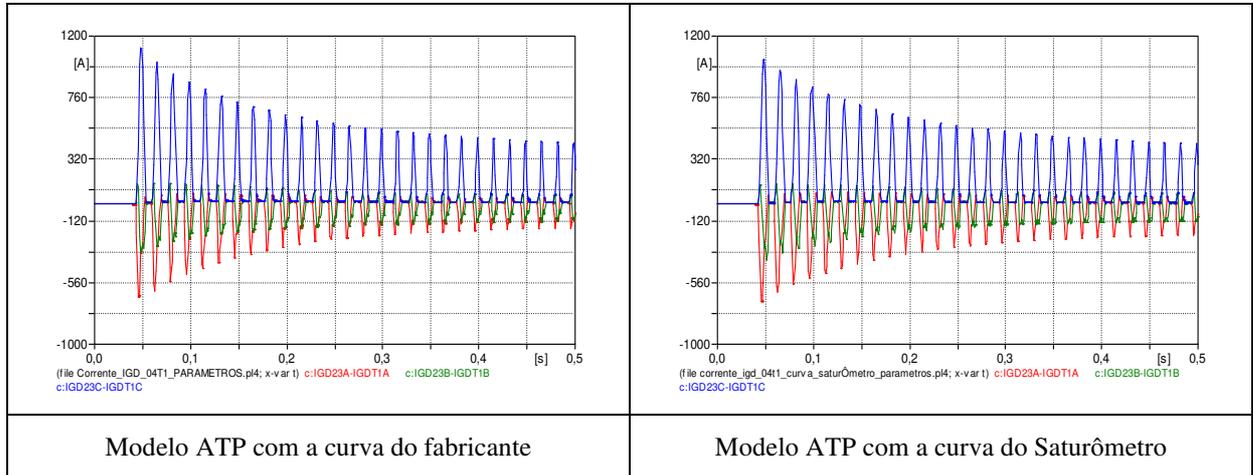


Figura 8-3 – Corrente de Inrush – Simulação – SE Igaporã

Fonte: Próprio autor

Da mesma forma que os casos anteriores, pelas formas de onda apresentadas, as diferenças na amplitude e no decaimento de cada uma das fases não são relevantes. O máximo pico da corrente de inrush resultante da curva do fabricante foi 1116,0 A enquanto com a curva do Saturômetro foi 1028,0 A. Comparando esse resultado com a corrente medida em campo, verifica que ambas as curvas de saturação utilizadas reproduziram um resultado satisfatório, tanto quanto ao pico máximo quanto ao decaimento, conforme é mostrado na Figura 8-4.

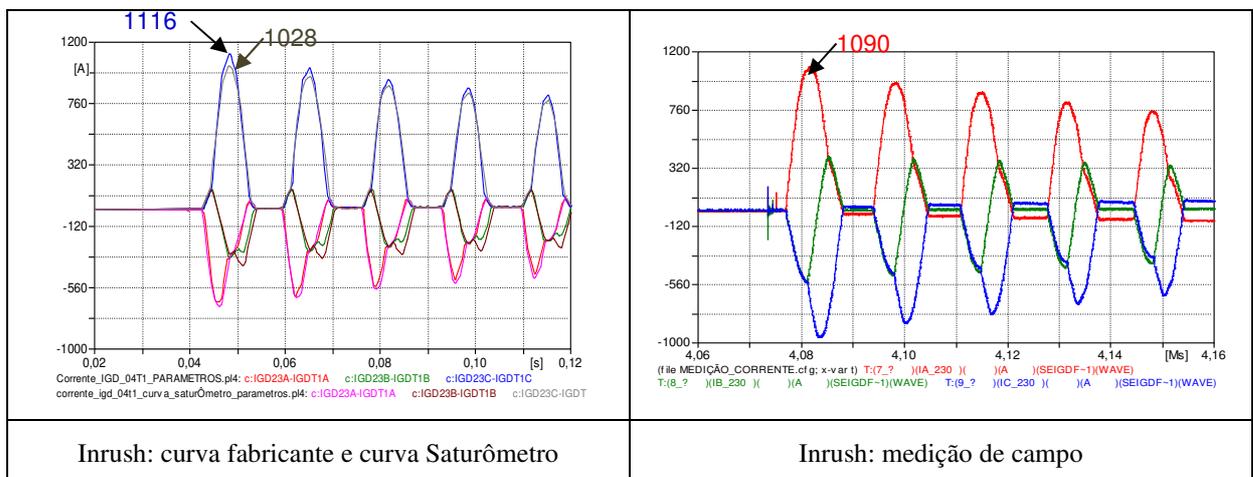


Figura 8-4 – Corrente de Inrush: curva do fabricante e curva Saturômetro vs Medição – SE IGD

Fonte: Próprio autor

Outra grandeza de interesse que pode ser confrontada para se verificar a influência de cada curva é a corrente de neutro observada no transformador. Comparando os resultados de simulação com a corrente medida em campo, verifica que ambas as curvas de saturação utilizadas reproduziram um resultado satisfatório, para o pico máximo apesar do comportamento da corrente registrada em campo ter diferenças significativas, conforme é mostrado na Figura 8-4

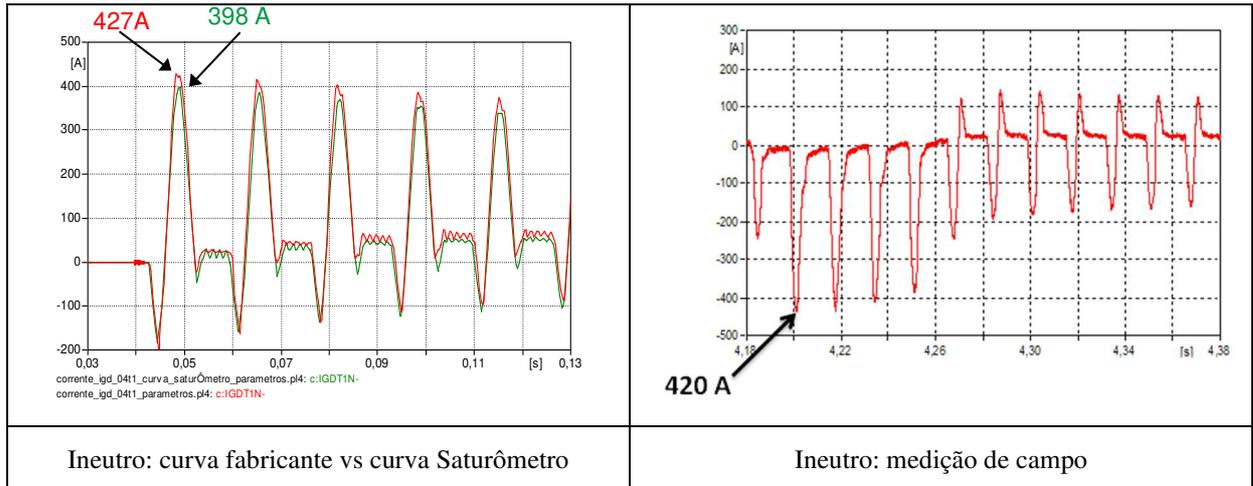


Figura 8-5 Corrente de Neutro: curva do fabricante e curva Saturômetro vs Medição – SE IGD
 Fonte: Próprio autor

Para o caso dos transformadores da SE Igaporã, tanto a curva de saturação informada pelo fabricante quanto a obtida pelo Saturômetro apresentaram resultados satisfatórios.

Ressalta-se que os resultados apresentados nestes estudos têm como base a comparação de resultados de simulações computacionais com medições em campo, comparações estas sujeitas a diversas incertezas inerentes a modelagem do sistema e que impactam diretamente nos resultados obtidos. No entanto, tomando como referência os resultados obtidos para subestação de Igaporã II, considera-se que a metodologia foi validada, pois foi possível reproduzir com precisão a corrente de inrush registrada em campo, utilizando no modelo em ATP do transformador manobrado, a curva de saturação modelada a partir do Saturômetro.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES.

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões desse trabalho de dissertação.

9. Conclusões

Diante do interesse de empresas do setor elétrico de ter uma metodologia de fácil aplicação para o levantamento de curvas de magnetização de transformadores de potência, esse trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma ferramenta para levantamento das características magnéticas de transformadores de potência, possibilitando validar ou refinar o modelo computacional de transitórios eletromagnéticos desses equipamentos. Optou-se então pela utilização da metodologia que toma como base o registro das tensões e correntes transitórias durante a energização em campo dos transformadores.

A estratégia proposta trouxe vantagens práticas, principalmente na determinação do instante de energização e do fluxo residual, que afetam diretamente os resultados obtidos por metodologias anteriormente propostas na literatura. Além disso, a realização de simulações computacionais demonstra a influências da nova curva estimada pela metodologia e ferramenta desenvolvida em um estudo real do sistema da Chesf (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - Brasil).

Os resultados apresentados permitem concluir que:

- O uso das tensões transitórias e das correntes elétricas resultantes da energização de transformadores permite a estimação de sua curva de saturação. Sendo muito útil quando não se conhece as características magnéticas da unidade de interesse;
- A metodologia desenvolvida tem robustez para obtenção da curva de saturação de transformadores, desde que seja feito a correta definição dos intervalos de interesse para o cálculo da integral da tensão medida;
- Há necessidade de medição das três fases, uma vez que o ponto na onda de tensão de cada fase, durante o chaveamento do transformador, influencia diretamente nos resultados obtidos pela metodologia. Esta forma possibilita mais garantia de obtendo-se o fluxo magnético máximo, visto que ao menos uma das fases será chaveada próximo ao mínimo da respectiva onda de tensão;
- A utilização do filtro de Kalman para detecção mais precisa do instante de chaveamento de cada fase se mostrou adequada para obtenção do real momento de energização do transformador.
- A obtenção do fluxo residual é muito relevante na obtenção do joelho da curva. Tal fato foi contornado registrando-se a tensão mantida em um dos enrolamentos

pós desenergização do transformador e calculando-se a partir dessa tensão o fluxo residual do núcleo magnético. Para tanto, é necessário haver instalado um TP, em pelo menos um dos bays do transformador.

- A aplicação do Filtro de Kalman, a consideração da circulação de corrente nos enrolamentos em delta para determinação da corrente de magnetização, bem como encontrar uma forma de cálculo do fluxo residual, trouxe consideráveis avanços no decorrer desse trabalho.
- As diferenças encontradas entre o joelho da curva de saturação e a reatância de dispersão (X_{ac}) dos casos medidos ao longo dos estudos, quando comparados os parâmetros disponibilizados pelos fabricantes não geraram impactos significativos nas grandezas de interesse dos estudos pré-operacionais de energização de transformadores, o que é um indicativo que as curvas fornecidas pelos fabricantes representam de maneira satisfatória o comportamento magnético de seus transformadores para esse tipo de estudo.
- O modelo STC (Saturable Transformer Component) do ATP representa adequadamente o comportamento transitório de transformadores durante sua energização.

Sendo assim, conclui-se que este trabalho de mestrado desenvolveu uma metodologia que permite uma estimação da curva de magnetização dos transformadores e autotransformadores de potência já instalados nas subestações do SIN, independentemente de sua potência nominal, tipos e número de ligação e ponto de conexão na rede. Sendo especialmente importante para os casos em que não existem dados precisos do comportamento magnético destes equipamentos

Uma das grandes vantagens obtidas é a metodologia pode ser aplicada a partir de arquivos oriundos das redes de oscilógrafas presentes nas subestações, cujos registros podem ser coletados remotamente, não precisando se deslocar até o campo.

9.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros propõe-se avaliar a influência dos erros dos transformadores de potencial e corrente na estimação da curva de saturação dos transformadores de potência, uma vez que alguns destes instrumentos, especialmente os transformadores de potencial capacitivo (TPC), não apresenta boa resposta em frequência para regimes transitórios como a energização de transformadores.

Outro estudo relevante seria aplicação da metodologia para levantamento das características eletromagnéticas de transformadores de potencial indutivo (TPI), que são equipamentos sempre sujeitos a fenômenos de ferorressonância. O conhecimento preciso dessas características possibilita reproduzir o fenômeno e testar, via simulação, a eficácia de elementos que venham a eliminar os riscos de ocorrência ferorressonâncias.

Outro estudo interessante é avaliar alternativas para definição do fluxo residual.

Por fim, deve-se avaliar outros métodos e algoritmos de reconhecimento de padrão para detecção do instante de energização do transformador.

10. Referências Bibliográficas

- [1] COSTA, J. M. S. C., FREIRE, A. R. F., BARROS, S. A., GUIMARÃES, A. C. S. L., CASADO, L. M., “Metodologia e Critérios para Estudos de Energização de Transformadores de Potência: Experiência Da Chesf”, XIII Eriac, Puerto Iguazú, Argentina, maio de 2009.
- [2] ATP – Alternative Transients Program – Rule Book, 1987
- [3] GUIMARÃES, A. C. S. L., COSTA, J. M. S. C., CASADO, L. M., “Avaliação Dos Estudos De Energização De Transformadores Em Função Dos Resultados De Medições Em Campo”, X SSNPTEE, Recife, Novembro de 2009.
- [4] ABDULSALAM, S. G., XU, W., NEVES, W. L. A., LIU, X., "Estimation of Transformer Saturation Characteristics from Inrush Current Waveforms", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 170-177, January 2006.
- [5] DICK, E. P., WATSON W., “Transformer Models for Transient Studies Based on Field Measurements”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-100, p. 409-419, jan. 1981.
- [6] CALABRO, S.; COPPADORO, F.; CREPAZ, S. The Measurement of the Magnetization Characteristics of Large Power Transformers and Reactors Through D.C. Excitation. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 01, n. 4, p. 224-234, out. 1986.
- [7] GOKHALE, S. L. Saturation Permeameter. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 47, n. 2, p. 423-427, abr. 1928.
- [8] LIN, C. E.; CHENG, C. -L.; HUANG, C. -L. Hysteresis Characteristic Analysis of Transformer Under Different Excitations Using Real Time Measurement. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 2, p. 873-879, abr. 1991.
- [9] FEYZI, M.R.; SABAHI, M. Online Dynamic Parameter Estimation of Transformer Equivalent Circuit. 42nd International Universities Power Engineering Conference, Shanghai, v.2, p. 01-05, 2007.
- [10] TAKEHARA, J. et. al. Finite element analysis of inrush currents in three-phase transformers. IEEE Transactions on Magnetics, v. 23, n. 5, p. 2647-2649, set. 1987.
- [11] PRUSTY, S.; RAO, M. A Novel Approach for Predetermination of Magnetization Characteristics of Transformers Including Hysteresis. IEEE Transactions on Magnetics, v. 20, n. 4, p. 607-612, jul. 1984.

- [12] LIU, S.-T. et. al. Current Transformer Module Basing the Jiles-Atherton Hysteresis Model in EMTP/ATP Simulation. The 7th International Power Engineering Conference, Singapore, v. 2, p. 653 - 656, nov./dez. 2005.
- [13] NEVES, W. L. A. Transformer Modelling for Transient Studies. 1994. Tese de Doutorado – University of British Columbia, Vancouver, 1994.
- [14] NEVES, W. L. A.; DOMMEL, H. W. Saturation curves of delta-connected transformers from measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 3, p. 1432-1437, jul. 1995.
- [15] APOLÔNIO, R., “Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental”. 2004. Tese de Doutorado – Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [16] <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> .
- [17] AGUIAR, E. R., “Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência”, dissertação de mestrado - UFMG, abril de 2007.
- [18] http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA_fUAI/histerese.
- [19] CAMARGO. R.,” Desempenho de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência”, dissertação de mestrado – UNIFEI, outubro de 2010.
- [20] http://www.edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/349452/mod_resource/content/2/Transformadores_Teoria.
- [21] AZEVEDO, A. C., “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curto-circuitos “Passantes” e Correntes de Energização”. Tese de Doutorado – Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [22] BRONZEADO, H.; OLIVEIRA, J.C. “Transformer Saturation after a Voltage Sag Recovery”. IPST’2001 International Conference on Power Systems Transients, Rio de Janeiro, 2001.
- [23] BRONZEADO, H. S. and YACAMINI, R., “Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients”, IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol. 142, no. 4, pp. 323–329, July 1995.
- [24] NOGUEIRA, D. S.; ALVES, D. P., “Transformadores de Potência – Teoria e Aplicação - Tópicos Essenciais”, trabalho de graduação, POLI-UFRJ, abril 2009.

- [25] CZERNORUCKI, M. V., “Representação de transformadores em estudos de transitórios eletromagnéticos” Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.101 p.
- [26] RIBEIRO, N. S. S., LIMA, J.F.F., “Discussão sobre a influência da reatância x_{pt} na obtenção da reatância em núcleo de ar (x_{ac}) para representação de curvas de magnetização no lado de alta tensão em transformadores trifásicos para estudos de transitórios eletromagnéticos.”, XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, maio de 2009.
- [27] FERREIRA, A. G; CASTRO, V. D; ALCANTRA, L. P. Estimation of Transformers Saturation Curve. GCOI, 1982.
- [28] https://pt.wikipedia.org/wiki/C_Sharp.
- [29] <https://www.visualstudio.com>.
- [30] <http://www.ni.com/pdf/manuals/370086c.pdf>