

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**Centro Tecnológico**  
Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

*Maria Isabel da Costa Bandeira*

**AUTOMAÇÃO DO ENSAIO DE SATURAÇÃO EM  
TRANSFORMADORES DE CORRENTE UTILIZADOS  
EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina  
para obtenção do Grau de Mestre em Metrologia**

**Orientador: Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.**

**Florianópolis, 2004.**

# **AUTOMAÇÃO DO ENSAIO DE SATURAÇÃO EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE UTILIZADOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Maria Isabel da Costa Bandeira**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

**Mestre em Metrologia**

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial.

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.  
Orientador

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.  
Coordenador do Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

## **Banca Examinadora:**

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.  
Departamento de Engenharia Mecânica – PUCPR

Prof. Hari Bruno Mohr, Dr. Eng.  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFSC

A todos que acreditam, persistem, entregam-se  
e realizam seus sonhos, com amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao LABMETRO, por ter me acolhido, me proporcionado uma formação com profissionais de indiscutível talento e competência, além da oportunidade de realizar esse trabalho que me transformou em uma profissional e pessoa muito, muito melhor.

Ao meu amor e companheiro, Flavio, por toda a força, apoio, paciência, dedicação e essencial contribuição no trabalho de arte gráfica.

A minha querida mãe, Eliete, pela sua dedicação, luta, esforços e orientação na minha formação.

Ao grande Professor Carlos Alberto Flesch, por todo o seu empenho, paciência, impecável orientação e competência, bom humor e valorosa contribuição neste documento.

Aos profissionais da ELETROSUL que me apoiaram desde o início desse trabalho e participaram da sua estruturação com muito profissionalismo, dedicação e otimismo: Egidio Loch, Paulo Bernardes, Clândio Radeck e Dalvir Maguerroski.

Aos profissionais do LALTE, onde foi implementado esse projeto, pela estrutura concedida, profissionalismo, dedicação e ampliação das suas aplicações.

Ao amigo Mestre, César Penz, pela grande e fundamental ajuda, competente e tranqüila, nos momentos mais difíceis.

Aos amigos por todo carinho, amizade, apoio e companheirismo: Jana, Lu, Sânia, Césare, Liliana, Mario, Alex, Ana, Jaison, Gemaque, Puchalski, Fabrício (em memória) e todos da especial e única turma 2002.

“Somos todos anjos de uma única asa e só podemos voar quando abraçados uns aos outros”.

## **RESUMO**

A garantia da confiabilidade dos transformadores de corrente utilizados nos sistemas de transmissão de energia elétrica é obtida através de ensaios. O ensaio de saturação é um deles.

Foi acompanhado o dia-a-dia de um dos mais competentes laboratórios do Brasil na área e foi feito um levantamento do estado-da-arte de tal ensaio no tocante à metrologia. Observou-se quase completa omissão com relação a aspectos metrológicos, em especial no tocante à avaliação da incerteza, em publicações, procedimentos e normas.

Identificou-se também a possibilidade de automação de tal ensaio, com investimentos de pequena monta. Desenvolveu-se um sistema automatizado com Labview. Promoveu-se uma avaliação da incerteza e propôs-se uma forma de considerar tal incerteza na análise da conformidade dos equipamentos. A automação permitiu auferir ganhos significativos, operacionais e de confiabilidade metrológica.

## **ABSTRACT**

The guarantee of the reliability of the current transformers used in the systems of electrical energy transmission is gotten through tests. The saturation assay is one of them.

The day-by-day of one of the most competent Brazilian laboratories in the area was followed and was made a survey about the state of the art in this assay that relates to metrology. Almost complete omission with regard to metrological aspects was observed, in special in that it relates to the uncertainty evaluation in publications, procedures and norms.

It was also identified the possibility of automate this assay with investments of small sum. An automated system with Labview was developed. An evaluation of the uncertainty was promoted and a form to consider such uncertainty in the conformity analysis of the equipment was proposed. The automatization allowed to improve significant operational and metrological reliability profits.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: TC na linha de transmissão e conexão com instrumentos de medição e proteção. ....	18
Figura 2: Modelo do transformador de corrente .....	27
Figura 3: Representação fasorial do funcionamento do TC (as grandezas não estão representadas em proporção real) [3]. ....	29
Figura 4: Gráfico $I_2 = f(I_1)$ – Corrente limite a partir da qual o TC entra em saturação. Na medição curva (1) e na proteção curva (2). ....	31
Figura 5: Comportamento da curva de magnetização $b=f(h)$ e a resposta correspondente da corrente de excitação para 4 situações de operação [3]. ....	34
Figura 6: Regiões da curva de saturação de TC $V_S=f(I_m)$ ( $V_S=V_e$ e $I_m=I_e$ ) [2]. ....	35
Figura 7: Corrente secundária na saída de um TC – Saturado (preto) – Não saturado (azul) [19]. ....	37
Figura 8: Curva de saturação típica do TC – Ilustração de pontos críticos [40]. ....	44
Figura 9: Circuito elétrico do ensaio de saturação em TC.....	46
Figura 10: Diagrama em blocos da arquitetura de um sistema de aquisição de sinais .....	53
Figura 11: Elementos típicos de um sistema de aquisição de sinais.....	54
Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de automação do ensaio de saturação em TC .....	70
Figura 13: Diagrama de comando e potência da fonte de tensão AC variável.....	74
Figura 14: Circuitos de acionamento da fonte de tensão, isolamento, chaves de posição e conexão com o pente de bornes da placa DAQ.....	75
Figura 15: Módulo de operação - CONTROLE FONTE .....	78
Figura 16: Módulo de interface – REALIZAR ENSAIO.....	79

Figura 17: Painel frontal calibração da tensão .....	80
Figura 18: Montagem do circuito de ensaio de saturação automatizado para enrolamentos de medição de TC .....	84
Figura 19: Montagem do circuito de ensaio de saturação automatizado para enrolamentos de proteção de TC .....	84
Figura 20: Caixa do circuito de controle da fonte de tensão .....	86
Figura 21: Diagrama em blocos geral para as duas cadeias de medição e mapeamento das possíveis incertezas associadas .....	89
Figura 22: Diagrama em blocos do circuito da calibração dos transdutores .....	90
Figura 23: Curva de calibração do transdutor de tensão - nível de confiança de 95% .....	97
Figura 24: Curva de calibração do transdutor de corrente de (750 a 10000) mA - nível de confiança de 95% .....	100
Figura 25: Curva de calibração do transdutor de corrente de (10 a 750) mA - nível de confiança de 95% .....	100
Figura 26: Circuito elétrico equivalente da cadeia de medição da tensão .....	101
Figura 27: Circuito reduzido da cadeia de medição da tensão .....	104
Figura 28: Modelo equivalente da cadeia de medição da corrente .....	105
Figura 29: Diagrama da sub-rotina de balanço de incertezas .....	108
Figura 30: Ilustração da proposta para o estabelecimento do $L_c$ .....	113
Figura 31: Curva de saturação típica para TC classes C ou K com núcleo fechado [11]. .....	113



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Corrente e relações nominais simples para TC segundo a ABNT [9].....	20
Tabela 2: Cargas nominais para medição e proteção [11] [9]. .....	21
Tabela 3: Fator térmico normatizado para transformadores de corrente .....	22
Tabela 4: Descrição dos itens do circuito de ensaio de saturação automatizado ....	85
Tabela 5: Definição das incertezas padrões do processo de calibração com base no fabricante .....	93
Tabela 6: Incertezas obtidas na calibração do transdutor de tensão .....	95
Tabela 7: Características metrológicas dos instrumentos de calibração <sup>1</sup> .....	96
Tabela 8: Incertezas obtidas na calibração do transdutor de corrente .....	98
Tabela 9: Características metrológicas dos instrumentos de calibração .....	98
Tabela 10: Especificação de exatidão da placa DAQ 6024 E [91]. .....	106
Tabela 11: Faixas de medição na placa DAQ e VM correspondente .....	108
Tabela 12: Incertezas padrão e expandida das cadeias de medição.....	109

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 Caracterização do escopo deste trabalho.....	13
1.2 Objetivos do trabalho .....	14
1.3 Estrutura de apresentação do trabalho.....	15
2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE .....	17
2.1 Especificações .....	18
2.1.1 Corrente e relação nominal .....	19
2.1.2 Carga nominal .....	20
2.1.3 Fator térmico .....	21
2.1.4 Classes de exatidão .....	22
2.1.5 Tensão secundária nominal .....	23
2.1.6 Impedância secundária na proteção .....	23
2.1.7 Serviços de proteção e medição .....	24
2.2 Modelagem de TC .....	25
2.3 A saturação em transformadores de corrente.....	30
2.3.1 Curva de magnetização do TC.....	32
2.3.2 Efeitos da saturação de TC em campo .....	36
2.4 Considerações.....	38
3 ENSAIO DE SATURAÇÃO EM TC .....	40
3.1 Método de ensaio .....	41
3.1.1 Tolerâncias especificadas .....	42
3.1.2 Análise da curva de saturação .....	44
3.2 Realização de ensaio.....	45
3.2.1 Ensaio de saturação.....	45

3.2.2 Ensaio de exatidão para proteção – Método indireto .....	47
3.3 Confiabilidade metrológica.....	49
4 REQUISITOS PARA A AUTOMAÇÃO DE BANCADAS DE ENSAIOS.....	52
4.1 Sistemas de aquisição de sinais .....	53
4.1.1 Transdutores .....	54
4.1.2 Condicionador de sinais .....	55
4.1.3 Processamento e apresentação de dados .....	57
4.2 Estruturas usuais em aquisição de sinais .....	58
4.2.1 Instrumentos com interface de comunicação .....	59
4.2.2 Sistemas modulares ou bastidores .....	61
4.2.3 Placas de aquisição de dados.....	62
4.3 Escolha da estrutura adequada .....	65
5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DO ENSAIO.....	68
5.1 Estrutura do sistema de automação do ensaio.....	68
5.2 Descrição do <i>hardware</i> desenvolvido .....	69
5.2.1 Placa de aquisição .....	70
5.2.2 Medição da corrente e tensão .....	72
5.2.3 Controle da fonte de tensão .....	73
5.3 Descrição do software .....	76
5.3.1 Módulos de interface de operação. ....	77
5.3.2 Aquisição, processamento e armazenamento de dados.....	81
5.4 Procedimento de realização do ensaio .....	83
5.4.1 Diagrama da montagem física .....	83
5.4.2 Procedimento operacional.....	86
6 AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO SISTEMA DESENVOLVIDO .....	88

6.1 Caracterização do processo de medição.....	88
6.2 Avaliação a priori da incerteza da medição .....	90
6.2.1 Calibração dos transdutores .....	90
6.2.2 Avaliação da incerteza da calibração .....	92
6.2.2.1 Resultados da calibração do transdutor de tensão .....	95
6.2.2.2 Resultados da calibração do transdutor de corrente .....	97
6.2.3 Modelo das cadeias de medição .....	101
6.2.4 Placa DAQ .....	105
6.3 Balanço de incertezas.....	107
6.4 Aplicação da incerteza da medição na avaliação crítica dos resultados do ensaio .....	110
7 CONCLUSÕES .....	114
Recomendações para trabalhos futuros .....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Caracterização do escopo deste trabalho

Equipamentos dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica são ensaiados periodicamente para avaliação da conformidade. A conformidade de tais equipamentos é um dos principais requisitos da garantia da confiabilidade operacional do sistema de fornecimento de energia elétrica.

Tais ensaios são realizados em sua maioria de forma manual e sem grandes preocupações com aspectos metrológicos. Um desses ensaios é o de saturação realizado em transformadores de corrente (TC) para medição e proteção.

O conhecimento da curva de saturação de um TC é fundamental na especificação para sua instalação em campo. Essa característica é fornecida pelo fabricante de transformadores de corrente, a qual é verificada em ensaios de rotina por laboratórios que efetuam manutenção em equipamentos utilizados no sistema de transmissão de energia elétrica [1] [2] [3].

Um transformador desse tipo tem uma relação aproximadamente linear entre corrente no primário e tensão no secundário, desde que esteja operando fora da região de saturação. Quando saturado, tal relação deixa de ser válida, podendo implicar em erros de medição comprometedores para a confiabilidade do sistema elétrico [2] [3]. Além disso, retirar um transformador da condição de saturação exige procedimentos especiais não usualmente aplicáveis em campo.

O ensaio de saturação é realizado com o objetivo de verificar o comportamento da curva de magnetização do núcleo do TC e sua conformidade com a especificação do fabricante. O resultado do ensaio é apresentado graficamente,

onde se pode comparar o comportamento atual do transformador com ensaios anteriores e sua especificação [1].

Dos resultados do ensaio de saturação em TC também são retirados dados que permitem a verificação da exatidão para os enrolamentos de proteção [4]. A normalização existente para ensaios em transformadores de corrente fornece métodos diferentes para verificar a exatidão, porém pouco diz a respeito da saturação em si.

Mesmo sendo um ensaio importante, quase nada é encontrado na literatura e na prática do dia-a-dia dos laboratórios com relação à avaliação das incertezas de medição inerentes a tal ensaio.

Foram estabelecidos os objetivos deste trabalho a partir do estudo do estado-da-arte em ensaios de transformadores de corrente, em especial do ensaio de saturação, e do acompanhamento das atividades realizadas em um laboratório. Identificou-se um ambiente propício à aplicação da automação e da avaliação metrológica como forma de contribuição à confiabilidade do processo de avaliação da conformidade de equipamentos da transmissão.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

Como forma de contribuição à garantia da confiabilidade metrológica e operacional dos ensaios de saturação em transformadores de corrente, foram estabelecidos os seguintes objetivos para este trabalho:

- levantamento de informações sobre ensaios de transformadores de corrente e análise das correspondentes abordagens acerca de aspectos metrológicos;

- estabelecimento dos requisitos para automação de um ensaio de saturação;
- desenvolvimento e testes, em condições reais de utilização, de um sistema automatizado do ensaio de saturação em TC empregando o *software* Labview;
- avaliação metrológica do ensaio automatizado e proposta de forma de consideração das influências das incertezas das medições na avaliação da conformidade.

### **1.3 Estrutura de apresentação do trabalho**

Os capítulos deste documento estão divididos da seguinte forma:

O capítulo 2 faz a abordagem inicial sobre transformadores de corrente e a importância da saturação.

O capítulo 3 descreve os ensaios de saturação e faz considerações acerca dos aspectos metrológicos inerentes.

O capítulo 4 apresenta os requisitos para automação de um ensaio e analisa as configurações usuais em aquisição automatizada de ensaios.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento e implantação do sistema de automação junto um laboratório.

O capítulo 6 mostra a avaliação das incertezas das medições e propõe um método para considerar tais incertezas na análise da conformidade de um transformador de corrente.

O capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões de temas que possam ser explorados em trabalhos futuros para contribuir com a disseminação da cultura

metrológica no setor de ensaios de equipamentos do sistema de fornecimento de energia elétrica.



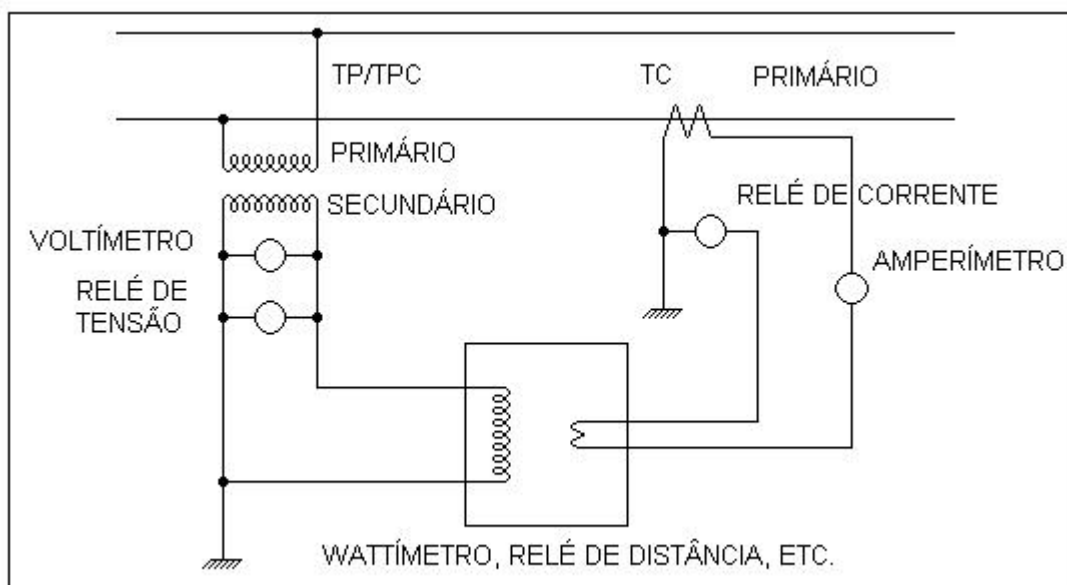
## 2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os transformadores de corrente (TC) fazem parte de um grupo denominado transformadores para instrumentos. Esses transformadores são mundialmente utilizados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Eles proporcionam isolamento contra as altas tensão e corrente do circuito de potência suprimindo instrumentos que integram os sistemas de medição, controle e proteção da rede de transmissão e distribuição [1] [4] [5].

O transformador de corrente é conectado à linha de transmissão com o seu circuito primário ligado em série com a linha de alta tensão. Seu enrolamento primário possui então impedância desprezível se comparada ao circuito externo [6] [1].

O circuito primário do TC é constituído de poucas espiras (duas ou três por exemplo) feitas de condutor de cobre de grande seção. Em muitos casos o próprio condutor do circuito de alta tensão serve como primário. O circuito secundário fornece uma corrente proporcional à passante na linha de transmissão, porém suficientemente reduzida, de forma que os instrumentos conectados a ele possam ser fabricados relativamente pequenos [1] [4] [5].

Esses instrumentos são instrumentos elétricos de baixa impedância, e fazem parte dos sistemas de proteção, medição e controle da rede. Tratam-se de amperímetros, bobinas de corrente de wattímetros, relés de corrente, entre outros. (figura 1) [1] [3] [4] [5] [7].



**Figura 1: TC na linha de transmissão e conexão com instrumentos de medição e proteção.**

As características do TC são definidas segundo a tecnologia utilizada pelo sistema e as funções previstas para a sua operação. Eles são especificados com base nos parâmetros de relação de transformação, potência, classe de exatidão, faixa de operação nominal e carga, em função da sua aplicação [2].

## 2.1 Especificações

Transformadores de corrente possuem padronização de suas características. As especificações para projeto, operação e realização de ensaios seguem regras determinadas em normas técnicas.

No Brasil existem três normas da ABNT:

- NBR 6546/91: Transformadores para Instrumentos – *Terminologia* [8];
- NBR 6856/92: Transformadores de Corrente – *Especificação* [9];
- NBR 6821/92: Transformadores de Corrente – *Método de Ensaio* [10].

Em nível mundial, dentre outras, têm-se as seguintes freqüentemente referenciadas na literatura:

- IEEE C57.13/1993 – IEEE Standard Requirements for Instruments Transformers. (revisão da antiga ANSI/IEEE C57.13/1978) [11].
- IEC – 60044-1– Instruments Transformers – Part 1: *Current Transformers* (NF C 42-502 na França) [12].
- IEC - 60044-6 – Instruments Transformers – Part 6 – *Requirements for protective current transformers for transient performance* [13].

Existem diferenças em algumas especificações entre as normas brasileiras e internacionais, principalmente no que se refere a limites de tensão e corrente em ensaios. Nesse trabalho serão seguidas as determinações da ABNT e da IEEE.

Essas normas especificam uma série de características que não são tratadas nesse item. Somente o que for significativo para o ensaio de saturação, objeto de estudo desse trabalho, é apresentado.

### **2.1.1 Corrente e relação nominal**

Os valores nominais de corrente primária e secundária para os transformadores de corrente são apresentados na NBR 6856 [9]. Esses valores normalizados valem para TC a serviço de proteção e medição.

Para os TC fabricados no Brasil são estabelecidas correntes primárias nominais ( $I_{1N}$ ) dentro de uma faixa que varia de 5 A a 8000 A. A corrente secundária nominal ( $I_{2N}$ ) é padronizada em 5 A, porém correntes de 1 A e 2 A podem também ser utilizadas. Em casos especiais na proteção pode-se encontrar TC com corrente secundária nominal de 2,5 A [5] [1].

A norma especifica as correntes primárias e as relações nominais para TC em quatro grupos. Esses grupos caracterizam respectivamente tipos de relações nominais simples, duplas, triplas e múltiplas.

A tabela 1 apresenta as relações nominais referentes ao grupo de relações simples. Desse grupo obtêm-se outros conjuntos de relações através da combinação de derivações no primário ou no secundário [9].

A relação entre  $I_{1N}$  e  $I_{2N}$  define a relação nominal ( $R_N$ ) do TC especificada pelo fabricante. Também chamadas de relação de transformação, atingem valor máximo de 1600:1 (tabela 1) ( $I_{1N}$  de 8000 A e  $I_{2N}$  = 5 A) [9] [5].

**Tabela 1: Corrente e relações nominais simples para TC segundo a ABNT [9]**

$I_{N1}$ (A)	$R_N$	$I_{N1}$ (A)	$R_N$	$I_{N1}$ (A)	$R_N$
5	1:1	100	20:1	1000	200:1
10	2:1	150	30:1	1200	240:1
15	3:1	200	40:1	1500	300:1
20	4:1	250	50:1	2000	400:1
25	5:1	300	60:1	2500	500:1
30	6:1	400	80:1	3000	600:1
40	8:1	500	100:1	4000	800:1
50	10:1	600	120:1	5000	1000:1
60	12:1	800	160:1	6000	1200:1
75	15:1	—	—	8000	1600:1

### **2.1.2 Carga nominal**

Segundo SOLON [5], a carga nominal de um TC é a carga na qual se baseiam os requisitos de exatidão do equipamento. Ela deve ser especificada levando em consideração o consumo dos aparelhos e da fiação [5].

As cargas nominais especificadas são designadas por um símbolo, formado pela letra C seguida de um número (segundo a ABNT) . Esse número representa em volt-ampères o quadrado da corrente secundária nominal multiplicada pela impedância da carga nominal (tabela 2).

Na designação da IEEE, a carga nominal é representada pela letra B seguida de um número que corresponde diretamente ao valor da impedância da carga nominal em ohms (tabela 2).

**Tabela 2: Cargas nominais para medição e proteção [11] [9].**

Cargas nominais para medição -Fator de potência 0,9						
Designação		Potência aparente (VA)	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância indutiva ( $\Omega$ )	Impedância - $Z_N$ ( $\Omega$ )	Tensão secundária nominal [ $FS \times I_{N2} \times Z_N$ ] (V)
ABNT	IEEE					
C 2,5	B-0,1	2,5	0,09	0,044	0,1	10
C 5	B-0,2	5,0	0,18	0,087	0,2	20
C 12,5	B-0,5	12,5	0,45	0,218	0,5	50
C 22,5	B-0,9	22,5	0,81	0,392	0,9	90
C 45	B-1,8	45,0	1,62	0,785	1,8	180
C 90	B-3,6	90,0	3,24	1,569	3,6	360
Cargas nominais para proteção – Fator de potência 0,5						
Designação		Potência aparente (VA)	Resistência $\Omega$	Reatância indutiva $\Omega$	Impedância - $Z_N$ $\Omega$	Tensão secundária nominal [ $FS \times I_{N2} \times Z_N$ ] (V)
ABNT	IEEE					
C 25	B-1	25	0,05	0,866	1,0	100
C 50	B-2	50	1,00	1,732	2,0	200
C 100	B-4	100	2,00	3,464	4,0	400
C 200	B-8	200	4,00	6,928	8,0	800

### 2.1.3 Fator térmico

Os TC são projetados e construídos para suportarem em regime permanente uma corrente maior do que a corrente nominal sem que qualquer dano lhes seja causado [5] [1].

Essa característica é definida pelo fator térmico. Ele é fixado pelo fabricante segundo os limites de elevação de temperatura. Sua determinação leva em consideração os diferentes tipos de materiais isolantes que podem ser utilizados na fabricação.

O fator térmico é definido como o número que deve ser multiplicado pela corrente primária nominal para obter a corrente máxima que o TC pode suportar em regime permanente. Adicionalmente é considerado o TC operando com carga e frequências nominais, sem exceder os limites de elevação de temperatura

correspondentes a sua classe de isolamento, e sem sair de sua classe de exatidão. (tabela 3) [9] [11] [5].

**Tabela 3: Fator térmico normalizado para transformadores de corrente**

<b>Norma técnica</b>	<b>Fator térmico</b>					
<b>ABNT [9]</b>	1,0	1,2	1,3	1,5	2,0	-
<b>IEEE [11]</b>	1,0	1,33	1,5	2,0	3,0	4,0

#### **2.1.4 Classes de exatidão**

A NBR 6856 classifica os transformadores de corrente em dois tipos quanto ao serviço a que se destinam: TC para serviço de medição e TC para serviço de proteção [9].

Os transformadores de corrente destinados ao serviço de medição devem ter uma boa exatidão no domínio da corrente nominal até sua corrente máxima determinada pelo fator térmico [2].

Eles são enquadrados, segundo a ABNT [9], nas classes de exatidão: 0,3%, 0,6% e 1,2%. Para classificar essa exatidão são considerados erros de relação e fase levantados em ensaios [2] [9].

Os transformadores de corrente destinados ao serviço de proteção, segundo a ABNT [9], se enquadram nas classes 5 ou 10, e classe 10 pela norma IEEE [11]. Para classificá-los é levado em consideração apenas o erro de relação [9] [11].

Na proteção o que interessa é o efeito produzido nos réles pelo módulo da corrente secundária em função do módulo da corrente primária. E, nesse caso, o erro de fase não oferece qualquer influência [1].

A classe de exatidão na proteção deve ser mantida dentro de limites de sobrecorrente. Essa característica define o fator de sobrecorrente (FS). Ele

estabelece a corrente máxima que o TC deve suportar sem sair de sua classe de exatidão, ou seja, sem que o erro de relação exceda o valor especificado [9] [11] [5].

Em [1] diz-se ainda que a classe de exatidão define o quanto de tensão no circuito secundário o TC pode suportar sem que o núcleo do TC entre em saturação. Essa definição pode ser melhor compreendida com as explicações dos itens 2.1.6 e 2.3.

### **2.1.5 Tensão secundária nominal**

A tensão secundária nominal é definida segundo a ABNT [9], como “a tensão que aparece nos terminais de uma carga nominal imposta ao TC a 20 vezes a corrente secundária nominal, sem que o erro de relação exceda o valor especificado” (tabela 2) [9]. Isso quer dizer que o TC deve suportar uma corrente máxima no seu circuito secundário proporcional a 20 vezes a sua corrente nominal sem transmitir erros superiores ao especificado por sua classe de exatidão.

A tensão secundária nominal representa a tensão máxima que o TC deve suportar em condições de sobrecorrente. O valor 20 é fixado pela ABNT como o valor padronizado para o fator de sobrecorrente [9].

Somente os TC para serviço de proteção atingem a tensão secundária nominal. Nos TC de medição, o núcleo satura muito antes da corrente secundária atingir esse valor (item 2.3) [14] [5].

### **2.1.6 Impedância secundária na proteção**

O erro de relação depende da impedância conectada ao circuito secundário. O cálculo da impedância total do circuito para efeitos práticos de especificação do TC utiliza como referência as cargas nominais padronizadas (item 2.1.2) [1].

Porém, os TC para serviço de proteção possuem ainda uma consideração no cálculo da impedância do circuito secundário. A ABNT subdivide esses TC em duas classes quanto a sua impedância [9] [5].

Os TC enquadrados na CLASSE A (CLASSE T segundo a IEEE) possuem alta impedância interna. Isso está relacionado à impedância total do circuito secundário quando esse alimenta sua carga nominal. Nesse caso a reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor significativo e é considerada nos cálculos [9] [5] [11].

Ao contrário, os TC de CLASSE B possuem baixa impedância interna. A reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor desprezível e não é considerada no cálculo da impedância total do circuito. (segundo a IEEE, equivale à CLASSE C) [9] [5] [11].

O cálculo da impedância total do circuito secundário também é utilizado para definir a tensão de operação [1]. É também aplicada no cálculo da tensão utilizada para o ensaio de exatidão pelo método indireto conforme está descrito no item 3.2.1 [9].

### **2.1.7 Serviços de proteção e medição**

Características marcantes são impostas no projeto de construção do TC no que se refere ao tipo de núcleo e tipo de enrolamento primário e secundário. São essas características que dividem o TC quanto a sua adequada utilização para medição e proteção [5] [2] [15].

Transformadores de corrente para serviço de medição não podem ser utilizados para proteção e vice-versa. Principalmente se for o caso de medição para fins de faturamento ao consumidor [5] [2] [15].



As características que impõem as diferenças e a necessidade de precaução são a classe de exatidão e o circuito magnético. Em termos de especificação, por exemplo, um erro de definição da classe de exatidão de um enrolamento de medição levará a um faturamento de energia errado e conseqüentemente a perdas para o distribuidor ou para o cliente [2] [15].

Do mesmo modo um erro de especificação na proteção pode levar ao acionamento indevido de um relé de proteção, ou até mesmo, ao não acionamento do mesmo em caso de distúrbios na linha de transmissão [2].

## 2.2 Modelagem de TC

O transformador de corrente ideal pode ser definido como um transformador, no qual qualquer condição no primário é reproduzida no circuito secundário com exata proporção e relação de fase [6].

Uma definição alternativa, e possivelmente melhor, é que o transformador de corrente ideal possui a relação ampères-espiras (excitação) do primário exatamente igual à magnitude da relação ampères-espiras do secundário. Além disso, essas relações estão em fases opostas [16] [6].

Sendo as excitações dos dois enrolamentos iguais, tem-se que:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (1)$$

Conseqüentemente, pode-se definir a relação de transformação nominal do TC como:

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} = K_N \quad (2)$$

onde  $K_N = \frac{N_2}{N_1}$  é a relação de transformação nominal do TC.

Em caso real:

$$\frac{I_1}{I_2} = K_r \quad (3)$$

onde  $K_r$  é a relação de transformação real, onde,  $K_c$  é diferente de  $K_r$  [16] [5].

O teorema de Ampère diz que a soma das correntes de uma bobina é igual à circulação de um vetor no campo magnético [3].

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = \int_{\text{Núcleo}} \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot dl \quad (4)$$

onde  $H$  representa o campo magnético e  $n$  o vetor unitário tangente. Logo, um transformador real é dito perfeito, ou ideal, quando:

$$\int_{\text{Núcleo}} \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot dl = 0 \quad (5)$$

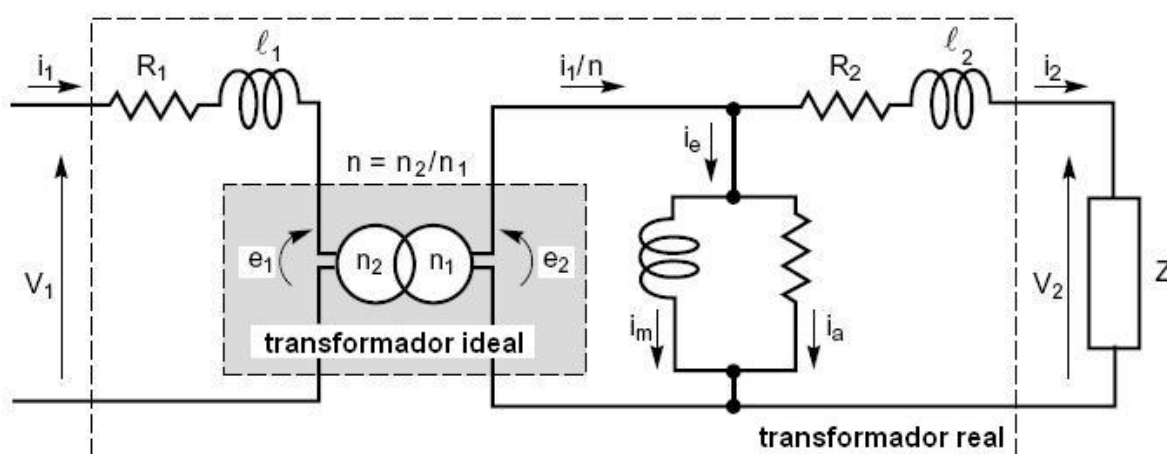
No transformador real esse termo expressa o erro introduzido pelo circuito magnético. Esse erro define a intensidade de excitação  $I_e$  gerada no secundário por:

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = n_2 \cdot i_e \quad (6)$$

Essa relação pode ser escrita como:

$$\frac{i_1}{n} + i_2 = i_e \quad (7)$$

O transformador pode então ser representado como no modelo da figura 2. Um transformador perfeito de relação  $n$  que induz ao secundário uma corrente  $I_1/n_1$  em paralelo com uma impedância que consome uma corrente  $I_e$ .



**Figura 2: Modelo do transformador de corrente**

Na realidade, é impossível manter a relação ideal, pois se as duas excitações fossem iguais e opostas, não existiria fluxo no núcleo. A corrente  $i_1/n$  refletida no circuito secundário é dividida em duas correntes. Uma é a corrente secundária real  $i_2$  que passa pela impedância da carga  $Z$ . A outra é a corrente de excitação  $i_e$  que passa através do ramo magnetizante para manter o fluxo no núcleo [16] [3] [6].

O ramo magnetizante funciona como se fosse um *shunt*. Ele introduz um erro de relação na transformação do TC. Os enrolamentos primário e secundário provocam uma queda de tensão interna devido à resistência da bobina dos enrolamentos  $R_1$  e  $R_2$  e das reatâncias de dispersão  $L_1$  e  $L_2$ . A corrente secundária provoca ainda uma queda de tensão externa pela carga  $Z$  [16] [3] [6].

Para equilibrar essas quedas de tensões precisa-se de uma força eletromotriz (fem). Mas em compensação necessita de um fluxo no núcleo, que é gerado pela diferença das duas excitações, que é responsável pelos erros do TC [3].

Se  $\varphi$  é o fluxo comum as duas bobinas pode-se escrever entre as fem  $e_1$ ,  $e_2$  e as diferenças de potencial (ddp)  $v_1$ ,  $v_2$  as seguintes relações:

$$V_1 = e_1 + R_1 \cdot i_1 + \lambda_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (8)$$

$$e_2 = v_2 + R_2 \cdot i_2 + \lambda_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (9)$$

$$e_1 = n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

$$e_2 = -n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

Se todas as funções descritas são senoidais de frequência  $\omega$  pode-se escrevê-las de forma vetorial:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + (R_1 + j\lambda_1 \cdot \omega) \cdot \vec{l}_1 \quad (12)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 + R_2 \cdot \vec{l}_2 \quad (13)$$

$$\vec{E}_1 = jn_1 \cdot \omega \cdot \vec{\Phi} \quad (14)$$

$$\vec{E}_2 = -jn_2 \cdot \omega \cdot \vec{\Phi} \quad (15)$$

$$\frac{l_1}{n} + \vec{l}_2 = \vec{l}_e \quad (16)$$

O esquema elétrico da figura 3 e as equações 12, 13, 14, 15 e 16 conduzem à representação fasorial apresentada na figura 3. A intensidade de excitação  $\vec{l}_e$ , é decomposta sobre os eixos  $\vec{\phi}$ ,  $\vec{E}$ , em:

$$\vec{l}_e = \vec{l}_a + \vec{l}_m \quad (17)$$

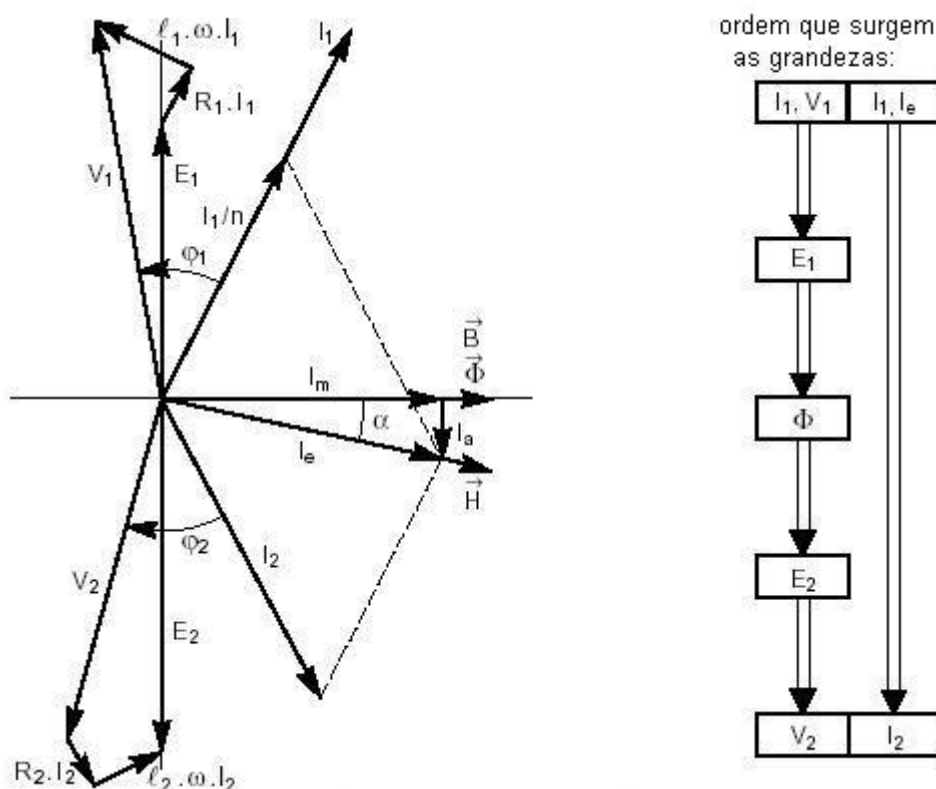


Figura 3: Representação fasorial do funcionamento do TC (as grandezas não estão representadas em proporção real) [3].

A representação fasorial de um TC tem o mesmo desenvolvimento que a de qualquer outro transformador. A transferência se dá entre as potências de um enrolamento a outro por criação da fem que induz o fluxo  $\phi$  [3] [14].

Para manter o fluxo magnético  $\phi$  no núcleo, precisa-se de uma corrente  $I_a$ , que irá provocar perdas no núcleo.  $I_a$  representa as correntes de perda no circuito magnético (perdas no ferro provenientes da histerese e das correntes de Foucault).

Ela faz aparecer uma corrente  $I_m$  (em quadratura com o fluxo).  $I_m$  é a corrente de magnetização que assegura o processo de transferência. Essas duas correntes, formam o triângulo de correntes, caracterizando a corrente de excitação  $I_e$  [3] [14] [6].

Sendo assim, a presença de  $I_e$  vai resultar numa diferença entre  $I_1/n$  e  $I_2$ , tanto na amplitude ( $\Delta I$ ), como no defasamento ( $\delta$ ). O valor da diferença das correntes  $\Delta I$  relacionado ao valor da corrente primária, chama-se erro de relação ( $\varepsilon$ ), enquanto o defasamento ( $\delta$ ) chama-se erro de fase de um TC [3] [16].

Os erros de fase não são tratados nesse trabalho por não serem significativos no ensaio de saturação. O erro de relação para TC é definido pela equação 18 [9] [16].

$$\varepsilon_R = \frac{K_N - [(I_1/I_2)]}{[(I_1/I_2)]} = \frac{K_N I_2 - I_1}{I_1} \quad (18)$$

## 2.3 A saturação em transformadores de corrente

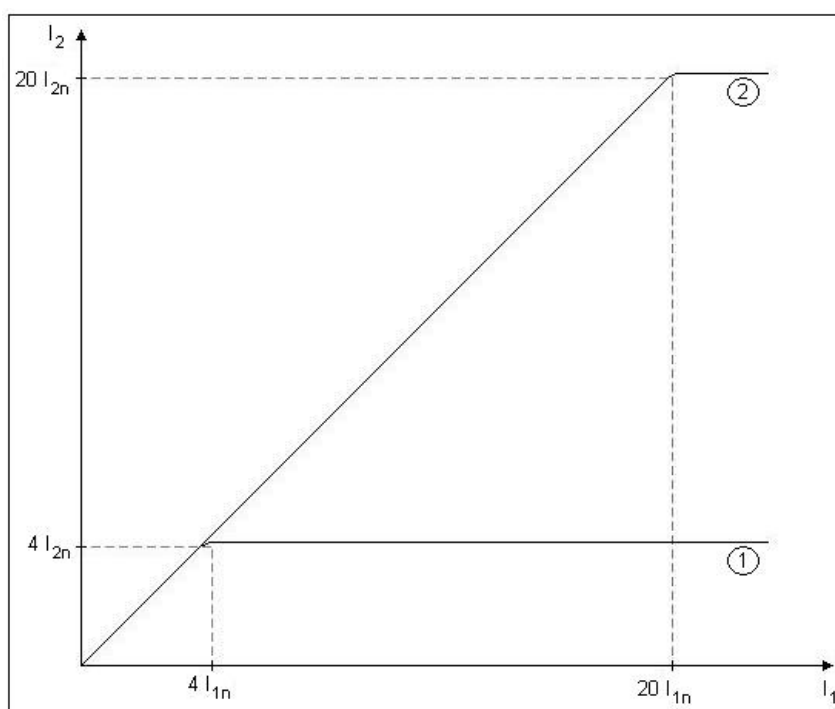
Os transformadores de corrente para serviço de medição possuem núcleo feito de material de elevada permeabilidade magnética. Isso quer dizer que possuem pequena corrente de excitação, pequenas perdas e baixa relutância. Trabalham sob condições de baixa indução magnética (cerca de 0,1 tesla) [14] [2] [5].

Eles entram em saturação logo que a indução magnética cresce para (0,4 a 0,5) tesla. O que corresponde a um crescimento da corrente primária de cerca de quatro vezes o seu valor nominal (figura 4).

Essa é a corrente máxima que será refletida no secundário ( $4 \times I_{2N}$ ) em caso de saturação, mesmo que a corrente primária ultrapasse essa ordem de grandeza e atinja valores excessivos [14] [2] [5].

Nesse caso não é necessário que os aparelhos de medição ligados ao circuito secundário suportem grandes intensidades de corrente, como os instrumentos ligados ao circuito de proteção [15] [2].

Essa característica também impede que a corrente secundária distorcida pela saturação do núcleo (figura 7) chegue aos instrumentos, o que poderia provocar erros na medição para fins de faturamento [3].



**Figura 4: Gráfico  $I_2 = f(I_1)$  – Corrente limite a partir da qual o TC entra em saturação. Na medição curva (1) e na proteção curva (2).**

O núcleo dos TC para proteção é feito de material magnético que não tem a mesma permeabilidade magnética que o TC para medição. Seu núcleo entra em saturação pra valores muito elevados do fluxo (indução magnética elevada).

Isso corresponde em termos práticos a uma corrente primária de cerca de 20 vezes o seu valor nominal (figura 4). Nos instrumentos de medição essa corrente poderia danificá-los. Porém os relés podem perfeitamente suportá-la desde que sejam especificados para essa condição [14] [2] [5].

Um TC para proteção deve saturar em altos níveis de corrente para permitir a medição de correntes de falta. Para isso tem seu limite de funcionamento muito

elevado, como também, devem ser os relés, disjuntores e contadores ligados ao circuito, capazes de suportar altas correntes [2].

Deve-se conhecer a resposta do TC em regime de saturação para assegurar o bom funcionamento da proteção, necessária para quando a corrente primária ultrapassa a intensidade nominal. Serve em particular para situações de curto-circuito quando surgem valores de corrente muito elevados [3].

O TC para proteção deve retratar com fidelidade as correntes de falta sem sofrer os efeitos da saturação. Na sua especificação deve-se considerar a tensão secundária máxima a partir da qual o TC passa a sofrer os efeitos da saturação. Nesse momento ele começa a não atender mais os requisitos de sua classe de exatidão [2] [3].

A suscetibilidade dos transformadores de corrente entrarem em saturação mediante correntes de curto-circuito tem implicação direta no desempenho dos sistemas de proteção dos equipamentos e linhas de transmissão [17].

O transformador de núcleo toroidal é amplamente usado em toda indústria de energia de potência. Suas vantagens incluem: baixo custo, isolamento galvânica, confiabilidade e fácil aplicação. Porém suas desvantagens são a facilidade de saturação e o fluxo remanescente [15].

Um método de evitar a saturação em TC é aumentar o tamanho do núcleo. Outro método é utilizar um material no núcleo que suporte grandes densidades de fluxo. Ambas as opções podem afetar no custo e na facilidade de aplicação do transformador [15].

### **2.3.1 Curva de magnetização do TC**

As propriedades dos materiais ferromagnéticos são representadas principalmente pela curva de magnetização. A qualidade de um circuito magnético é



traduzida pela relação que ele impõe entre o valor de indução B e o vetor campo magnético H (figura 3) [2].

Em um dado instante esses dois vetores são ligados pela permeabilidade magnética relativa do material magnético  $\mu_r$ , tal que:

$$\vec{B} = \mu_o \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (19)$$

O circuito magnético é então caracterizado pela curva  $b=f(h)$  chamada de curva de magnetização. Em regime senoidal b representa a tensão, pois:

$$\vec{B} = \frac{\Phi}{S} \cdot \vec{n} \quad (20)$$

$$\vec{E}_2 = n_2 \cdot j\omega \cdot \vec{\Phi} \quad (21)$$

$$\vec{V} = \vec{E}_2 \quad (22)$$

E h representa a intensidade da corrente de excitação dado que:

$$n_2 \cdot l_e = \int_{Núcleo} \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot d\vec{l} \quad (23)$$

supondo que:

$$\vec{H} \cdot \vec{n} = H = \text{constante} \quad (24)$$

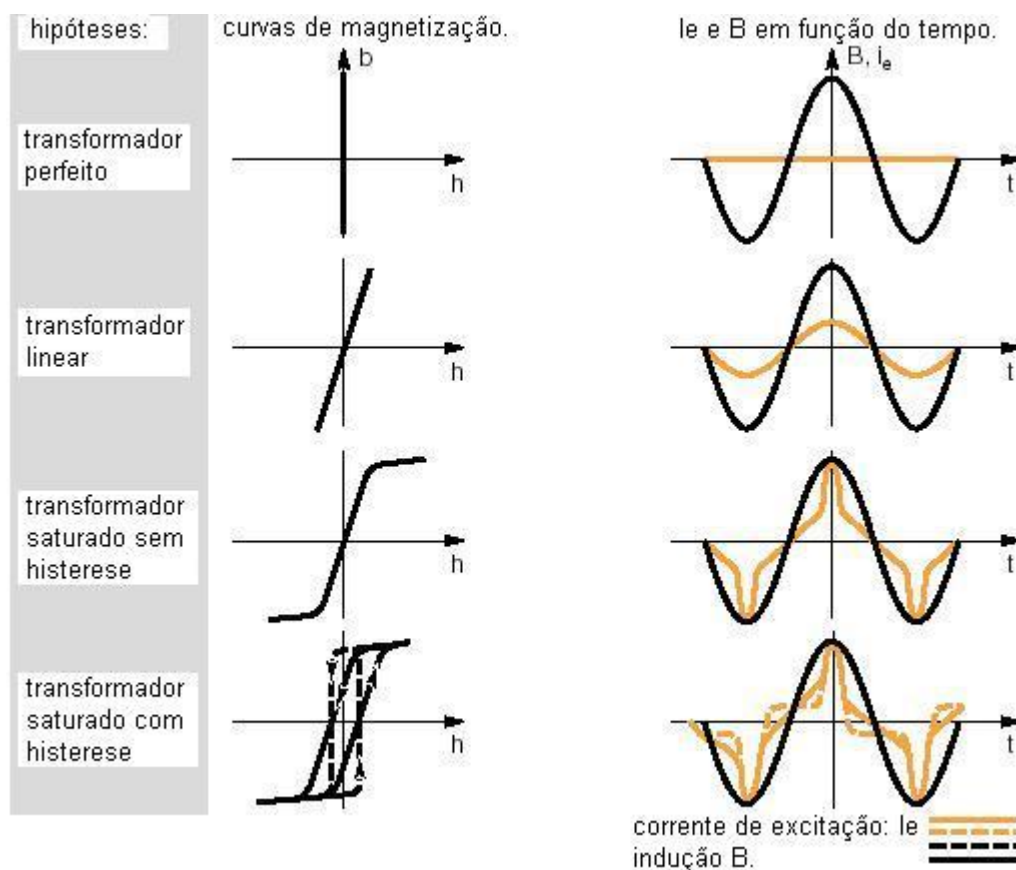
tem-se,

$$n_2 \cdot l_e = L \cdot H \quad (25)$$

Em um transformador perfeito a permeabilidade magnética é supostamente infinita:

$$\vec{H} = 0 \text{ onde, } \vec{l}_e = 0 \text{ e } \vec{l}_2 = \frac{\vec{l}_1}{n} \quad (26)$$

Essa hipótese está próxima da realidade quando o TC opera muito abaixo da saturação.  $I_2$  nesse caso é uma imagem fiel de  $I_1$  (figura 5 – transformador perfeito). As quatro situações apresentadas na figura 5 representam as possibilidades de operação do TC.



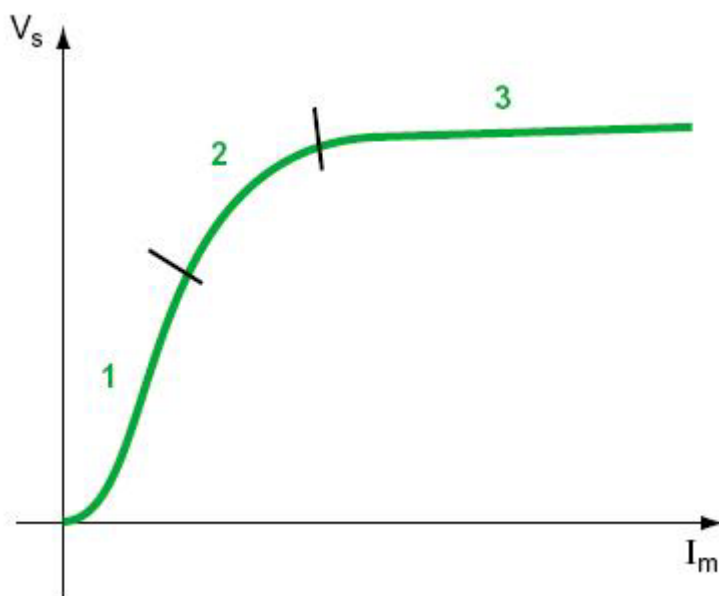
**Figura 5: Comportamento da curva de magnetização  $b=f(h)$  e a resposta correspondente da corrente de excitação para 4 situações de operação [3].**

- Transformador linear: a permeabilidade do núcleo é constante, onde  $I_e$  e  $I_2$  são funções senoidais.
- Transformador saturado sem histerese: a saturação representa uma variação brutal de  $\mu_r$ . Essa variação ocorre dentro de uma faixa que cresce rapidamente até um ponto de estabilidade chamado de “joelho da curva de saturação”. A indução B a partir desse ponto cresce muito lentamente e  $I_e$  se deforma passando a representar um ponto.

- Transformador saturado com histerese: a curva de magnetização é duplicada traduzindo a resistência do material do circuito magnético às variações de indução. A curva  $I_e$  presente tem uma forma característica.

A curva então estabelece a relação entre o valor da indução magnética do material  $B$  e o valor da intensidade do campo magnético  $H$  que a cria. Porém, segundo as equações (22) e (26) pode ser representada pela tensão de excitação no secundário ( $V_e$ ) em função da corrente de excitação  $I_e$  [3].

Na prática ela é assim determinada; e também é chamada de curva de saturação do TC. Seu resultado consiste, a grosso modo, no gráfico apresentado na figura 6. Sua trajetória pode ser dividida em três regiões [2] .



Legenda:

- 1- Região não-saturada – linear.
- 2- Região intermediária – joelho da curva.
- 3- Região saturada – não linear.

**Figura 6: Regiões da curva de saturação de TC  $V_s=f(I_m)$  ( $V_s=V_e$  e  $I_m=I_e$ ) [2].**

### **2.3.2 Efeitos da saturação de TC em campo**

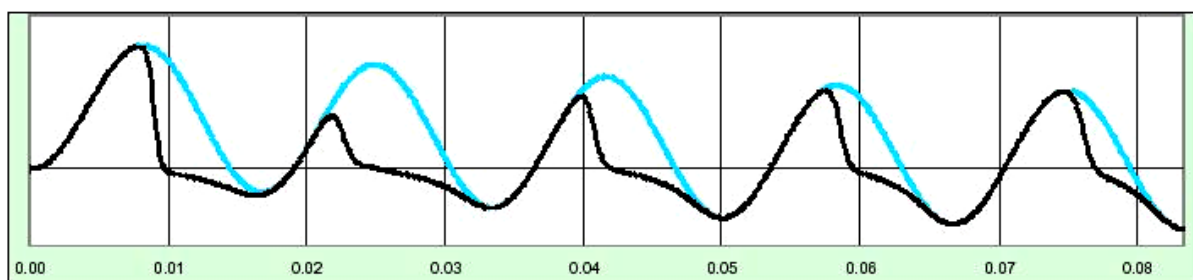
Os relés diferenciais detectam bem as falhas enquanto o TC estiver reproduzindo bem a corrente do primário [18]. O TC produz geralmente uma forma de onda que representa fielmente a corrente primária até que o núcleo sature [19] [7].

Evidências experimentais mostram que correntes de alta intensidade no primário provocam efeitos da saturação e histerese no material magnético o que resulta numa não linearidade na transformação, a qual não pode ser desconsiderada [7].

A saturação distorce a forma de onda da corrente secundária. A extensão da distorção depende do valor do fluxo remanescente no núcleo do TC e da presença de um *offset* DC na corrente primária [20] [18].

É comum, em linhas de transmissão, ocorrer situações que gerem sobrecorrentes no circuito. Essas situações levam geralmente à perda de alguma fase ou a um curto-circuito. E, de uma forma geral são denominadas correntes de falta [22].

A figura 7 mostra que o TC não entra em saturação imediatamente após a ocorrência de uma corrente de falta. A saturação provoca um corte na forma de onda secundária que aumenta com a saturação no núcleo [21] [19].



**Figura 7: Corrente secundária na saída de um TC – Saturado (preto) – Não saturado (azul) [19].**

O efeito da histerese faz com que o TC venha a saturar por um acúmulo de pequenas correntes de falta, isso se dá quando essas ocorrem em pontos não nulos da forma de onda e são bruscamente interrompidas, não havendo tempo de ocorrer desmagnetização do núcleo [20] [1] [14] [19].

Nessa situação, o núcleo permanece magnetizado e com uma alta densidade de fluxo. Isso faz com que uma nova pequena corrente de falta sobreponha os valores nominais de operação do TC, levando-o à saturação [20] [1] [14] [19].

É comum de acontecer em certas faltas externas, quando as correntes de falta são muito elevadas, o aparecimento de componentes significantes de tensão contínua (*DC offset*) que se sobrepõem às correntes de falta simétricas [19]. Chamadas de corrente de falta assimétrica podem levar um TC à saturação muito mais rapidamente do que várias pequenas correntes de falta simétricas sem componente contínua [15] [18].

A corrente contínua transiente flui pelo enrolamento primário do TC, enquanto o crescimento do fluxo do núcleo o leva à saturação. A corrente distorcida não será a representação fiel da corrente primária, o que pode levar o TC a uma saturação indevida [14] [15].

Essa saturação indevida em sistemas de proteção pode provocar o surgimento de altas correntes diferenciais. Isso pode causar um atraso no tempo de

operação de alguns relés convencionais e, conseqüentemente, a atuação indevida do circuito de proteção [22].

## **2.4 Considerações**

O comportamento do TC e suas especificações para operação e ensaio são cobertos pelas normas citadas neste documento. Contudo, elas têm o propósito de especificar o comportamento do TC em regime permanente e em condições de falta simétrica [15].

O comportamento do TC sob condições de faltas assimétricas é apresentado em vários estudos. Sendo grande motivo de preocupação, elas são fruto de uma má qualidade da energia elétrica transmitida.

Adaptações freqüentes na linha, inclusão de novas subestações sobrecarregam a linha de transmissão. Geram harmônicos e componentes contínuas na linha que fazem o TC operar em regime não linear (transitório).

As distorções harmônicas, por exemplo, ocorrem devido à operação de cargas não-lineares no sistema elétrico. São exemplos: fornos a arco, fornos de indução, máquinas de solda, conversores estáticos, compensadores estáticos, etc. Elas têm aumentado nos sistemas elétricos devido à aplicação crescente da eletrônica de potência [22].

Contudo, representar essas situações em laboratório para uma realização prática de ensaio ainda não se mostrou viável. Atualmente utilizam-se softwares que simulam as respostas transitórias a partir de especificações pré-definidas [22] [23].

Vários autores apresentam técnicas utilizadas em sistemas de proteção para detecção da saturação, ou algoritmos de compensação da mesma associada ao relé

de proteção para o caso de faltas assimétricas [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Todos tratam da saturação em transformadores de corrente em um regime que se encontra fora do escopo desse trabalho. Porém, seria omissivo falar sobre saturação em transformadores de corrente sem citar essa realidade que tange o tema.

Para delimitar claramente a abrangência deste trabalho acompanhou-se a execução de diversos ensaios e analisou-se procedimentos e relatórios.

Em comum acordo com o corpo técnico do laboratório em que esta dissertação foi realizada, optou-se pelo desenvolvimento do sistema de automação do ensaio de saturação e pela análise da sua confiabilidade.

As razões para tal estão expostas no capítulo 3.

### 3 ENSAIO DE SATURAÇÃO EM TC

A saturação em transformadores de corrente é um fato característico das propriedades de um equipamento que opera com indução ferro-magnética. Sua ocorrência é inevitável caso o TC opere em condições superiores as suas condições nominais [1].

Cabe então aos projetistas conhecer a curva de saturação do equipamento para bem especificar o TC para sua operação em campo [1]. A NBR 6856 [9] prescreve que o fabricante deve fornecer a *Curva típica de excitação* para TC a serviço de proteção [9].

A curva de saturação do TC define uma região satisfatória para operação dentro das suas características nominais e de acordo com as especificações do circuito onde operará. É um dos elementos utilizados na especificação do TC para sua operação em campo [1].

O TC é designado para operar em uma estreita faixa, na região inicial da curva de saturação. Um TC bem projetado sobre a corrente nominal, o ponto de trabalho fica na faixa linear da curva de saturação, com a corrente de excitação variando quase que proporcionalmente à tensão desenvolvida no secundário. Desse modo o máximo erro de relação do TC estará dentro da classe de exatidão especificada [1] [6].

Aos laboratórios que realizam manutenção em transformadores de corrente cabe verificar as condições de operação do equipamento segundo os dados fornecidos pelo fabricante [4] [5] [37] [36].



O ensaio de saturação faz parte então da rotina de ensaios realizados em TC. Seu procedimento de realização, porém, não está prescrito em norma como estão os ensaios de tipo e rotina estabelecidos para esse equipamento.

Visto que a corrente de excitação reflete o erro de relação do TC limitado por sua classe de exatidão, pode-se verificar a exatidão do TC para serviço de proteção através da curva de saturação. Esse método é descrito pela ABNT [9] como ensaio de exatidão para proteção pelo método indireto [9] [1].

No meio operacional é comum se referenciar a esse ensaio como “ensaio de saturação”. Não é uma expressão literalmente correta pois os limites de ensaio não chegam a representar a curva de saturação como um todo.

### **3.1 Método de ensaio**

O método de realização do ensaio de saturação consiste em levantar a curva de magnetização do núcleo do TC. O ensaio é executado a partir da aplicação de uma tensão de excitação ( $V_e$ ) à frequência industrial, no secundário do TC com o enrolamento primário aberto [4] [5] [9].

A tensão  $V_e$  aplicada gera no circuito de ensaio uma corrente de excitação ( $I_e$ ). Essa corrente absorvida pelo núcleo representa a intensidade de excitação proporcional ao circuito magnético  $H$  [3].

A integração da tensão  $V_e$  representa o fluxo  $\Phi$  que é proporcional ao vetor campo magnético  $B$  (equações 20 à 26). Assim obtêm-se na prática a curva de magnetização do TC [3].

Na realidade, o que ocorre é uma simulação da tensão secundária que seria gerada sobre uma carga nominal conectada ao TC em operação. As condições de

operação a serem analisadas e as condições do laboratório determinam os limites de tensão e corrente durante o ensaio.

### **3.1.1 Tolerâncias especificadas**

A ABNT [9] estabelece que o fabricante do TC deve fornecer a curva típica de excitação. Ela deve ser traçada para uma corrente de excitação de (1 a 500) % da corrente secundária nominal a uma tensão de excitação que não exceda a 1600 V [9].

Junto com a curva de excitação, deve ser fornecida a resistência a 75 °C do enrolamento secundário e dos condutores de ligação aos terminais. Para os TC da classe A deve ser ainda fornecido o valor da reatância de dispersão do enrolamento secundário indicando-se o método usado na sua obtenção [9].

A NBR 6856 foi a única referência direta ao ensaio de saturação especificado em norma encontrada em pesquisa bibliográfica efetuada. Existe, porém o ensaio dielétrico de tensão induzida, normatizado, que utiliza circuito e procedimento de ensaio semelhante ao ensaio de saturação. Parte desse ensaio consiste na aplicação de tensão à frequência industrial no enrolamento secundário do TC com os demais abertos. Tem o objetivo de fazer produzir a corrente de excitação [9] [11].

O ensaio é limitado pelo valor da corrente secundária nominal do enrolamento multiplicado pelo fator térmico. A tensão é limitada em 3500 V de pico para TC novos e 75 % dessa tensão para TC usados ou com enrolamento recuperado [9] [11].

Essa especificação é direcionada aos enrolamentos de proteção. Aos enrolamentos destinados à medição a corrente é também limitada pelo fator térmico e a tensão especificada em 282 V de pico ou 200 V em valor eficaz (RMS) [9] [11].

No âmbito dos profissionais que realizam esses tipos de ensaio em TC, bem como fabricantes do equipamento, os limites estabelecidos para o ensaio de tensão

induzida são compreendidos como aceitáveis para a realização do ensaio de saturação [4].

Na verificação da classe de exatidão para proteção pelo método indireto o limite de tensão é especificado em norma. Uma equação determina a tensão secundária máxima para a operação do TC dentro da sua classe de exatidão [4] [5] [9] [10].

A IEEE [11] estabelece que a curva típica de excitação deve ser traçada em gráfico logaritmo para todas as relações do TC. Desde 1% da tensão nominal até a tensão que causará uma corrente de excitação igual a 5 vezes a corrente secundária nominal [11].

No gráfico deverá estar sinalizado o ponto que determina o joelho da curva. Também deverá estar especificada a tolerância máxima dos valores de excitação acima e abaixo do joelho da curva [11].

Apesar dessa determinação da IEEE [11] esses dados não foram encontrados em nenhuma curva de saturação da documentação do laboratório onde foi desenvolvida a dissertação. Dos gráficos analisados destacam-se os fabricantes de TC: ALSTON, ABB e TOSHIBA.

Diante dessas especificações diversas, retiram-se os limites especificados para realização do ensaio de saturação. Para TC novos o fabricante deve fornecer a curva de saturação para uma corrente de excitação de até 25 A [9] [11].

Na prática é assim que as especificações são de fato apresentadas. O limite de tensão varia para os fabricantes entre os 3500 V de pico determinados para o ensaio de tensão induzida [9] [11] e os 1600 V de valor eficaz especificado pela ABNT [9].

A realização do ensaio de saturação, por laboratórios de manutenção, ocorre normalmente em TC usados ou recuperados. A corrente de excitação é então limitada pelo fator térmico. A tensão eficaz é limitada em aproximadamente 1860 V rms (75 % de 3500 V de pico) na proteção e 200 V na medição [9].

### 3.1.2 Análise da curva de saturação

A figura 8 apresenta uma curva típica de saturação em gráfico logarítimo. Essa figura ilustra regiões e pontos considerados na análise dos resultados do ensaio. Sabe-se que o fluxo aumenta proporcionalmente com a corrente primária até o ponto de início da saturação.

Esse ponto é chamado de ponto de permeabilidade máxima ou joelho da curva de saturação. Observa-se que na região não saturada (anterior ao joelho da curva) a relação entre a tensão e a corrente é constante [2] [11] [40].

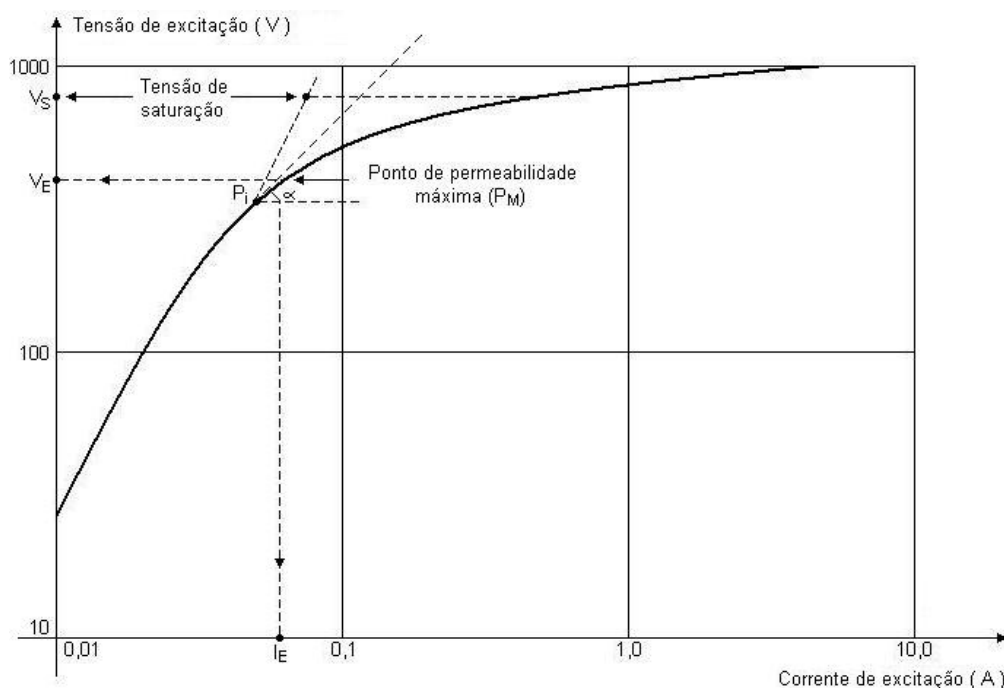


Figura 8: Curva de saturação típica do TC – Ilustração de pontos críticos [40].

Na região de saturação (a partir do joelho da curva) essa relação começa a diminuir. A tensão de saturação ( $V_S$ ) e o ponto de permeabilidade máxima ( $P_M$ ), são determinados graficamente em função da curva de saturação do TC [40].

A tensão de saturação é definida pela interseção das projeções das partes retas da curva de saturação. O ponto de permeabilidade máxima ( $P_M$ ) é o ponto em que a reta tangente, que parte do ponto de inflexão da curva ( $P_i$ ) (início da curva), se desloca da mesma definindo o joelho da curva de saturação [40].

Para TC com núcleo fechado (*nongapped*) essa tangente possui coeficiente angular  $\alpha=45^\circ$  com a abscissa. Para TC com núcleo aberto (*gapped*) essa tangente possui coeficiente angular  $\alpha=30^\circ$  com a abscissa [11] [40].

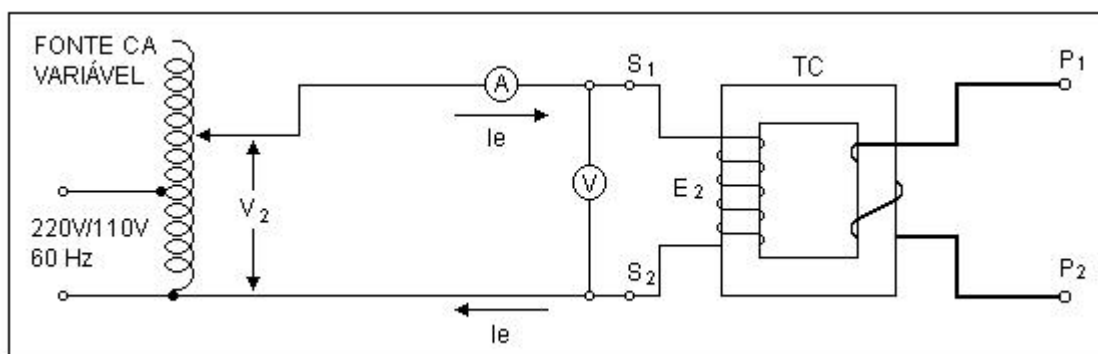
O joelho da curva também é definido como um ponto na curva de saturação a partir do qual um aumento de 10% na tensão induzida, provoca um aumento de 50% na corrente de excitação [2] [11].

A norma IEEE [11] especifica que a curva de saturação deve ser levantada na rotina de ensaios para enrolamentos de proteção. Especifica também que o ponto de permeabilidade máxima deve ser determinado de acordo com o traço das tangentes. Adicionalmente estabelece que, na análise dos resultados, a corrente de excitação não deverá exceder a 125% do valor típico da curva fornecida pelo fabricante [11].

## **3.2 Realização de ensaio**

### **3.2.1 Ensaio de saturação**

O ensaio de saturação é realizado basicamente com o circuito de ensaio apresentado na figura 9 [5]. Uma fonte de tensão CA variável é conectada ao circuito secundário do TC com o primário aberto [4] [5] [38] [39].



**Figura 9: Circuito elétrico do ensaio de saturação em TC**

Instrumentos de medição (amperímetro (A) e voltímetro (V)) são conectados no circuito de ensaio como mostra a figura. Antes e depois do ensaio deve ser feita a desmagnetização do núcleo [38] [39].

O processo de desmagnetização é realizado com o mesmo circuito de ensaio. Eleva-se a tensão no secundário até 1,2 vezes a tensão nominal. Atingida a tensão determinada, imediatamente ela é reduzida até zero. Esse procedimento é realizado 3 vezes [38] [39].

Após a desmagnetização do núcleo o ensaio é iniciado. A tensão de excitação é então aplicada desde 0 V até o limite especificado pelo laboratório. O limite é determinado pelos equipamentos disponíveis do laboratório, norma de referência utilizada, tipo e condições do enrolamento sob ensaio conforme apresentado no item 3.1.1.

A tensão é aplicada em degraus pré-definidos. A cada degrau de tensão, a elevação da tensão é interrompida para a medição da tensão e corrente de excitação. Os dados são registrados manualmente em folha de ensaio [38] [39].

Alguns laboratórios utilizam a corrente como referência. Determinam previamente degraus de corrente. Elevam a tensão observando o amperímetro até

atingir o limite de corrente definido. Nesse momento interrompe-se a elevação da tensão para registro dos valores [38] [39].

Em ambos os casos a corrente é monitorada com atenção. Caso ocorra uma elevação brusca da corrente durante a aplicação da tensão, é constatada a saturação do núcleo. O ensaio é interrompido e o TC é identificado como saturado.

Os dados de ensaio são passados manualmente para uma planilha EXCELL onde é gerado o gráfico da curva de saturação. A partir daí os resultados podem ser graficamente analisados.

### **3.2.2 Ensaio de exatidão para proteção – Método indireto**

O critério usado para a classificação da exatidão dos TC para proteção tem como base a maior tensão que pode ser induzida no secundário, sem saturação e, conseqüentemente, sem exceder o erro de relação especificado [4].

Nesse ensaio verifica-se o erro de relação percentual ( $\varepsilon\%$ ) do TC para proteção e conseqüentemente a sua classe de exatidão. A classe de exatidão corresponde a uma determinada carga padronizada (tabela 2) no secundário, no qual circulam correntes que variam desde a nominal até 20 vezes a nominal [2] [5] [10].

O erro percentual é dado por:

$$\varepsilon\% = \frac{k_N I_2 - I_1}{I_1} \times 100 \quad (27)$$

A tensão induzida no enrolamento secundário pode ser expressa pela equação 28, onde  $r_2$  e  $x_2$  representam respectivamente a resistência e reatância do enrolamento secundário.

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 + r_2 \vec{I}_2 + jx_2 \vec{I}_2 \quad (28)$$

A carga nominal padronizada é representada pela equação 29.

$$\vec{V}_2 = R \vec{I}_2 + jX \vec{I}_2 \quad (29)$$

Assim tem-se a equação da tensão induzida no núcleo (30) que em módulo tem a forma da equação 31.

$$\vec{E}_2 = (R + r_2) \vec{I}_2 + j(X + x_2) \vec{I}_2 \quad (30)$$

$$E_2 = I_2 \sqrt{(R + r_2)^2 + (X + x_2)^2} \quad (31)$$

A equação 31 é especificada pela ABNT como a tensão que deve ser induzida no circuito secundário para verificação da classe de exatidão. Os valores da resistência (R) e reatância (X) da carga nominal são fornecidos pela tabela 2 [5] [9].

A reatância ( $x_2$ ) e resistência ( $r_2$ ) do enrolamento secundário são fornecidas pelo fabricante. A corrente  $I_2$  para a qual a exatidão é verificada é determinada em situações de sobrecorrente. O fator de sobrecorrente ( $F_S$ ) igual a 20 é então multiplicado pela corrente nominal  $I_{2N}$  padronizada em 5 A [5] [9] [10].

Considerando que a corrente secundária  $I_2 = F_S I_{2N}$  utilizada no cálculo de  $E_2$  possui um valor equivalente no primário:  $I_1 = k_N F_S I_{2N}$ , assim sendo a expressão do erro percentual é descrita como:

$$\varepsilon\% = \frac{I_e}{F_S I_{2N}} \times 100 \quad (32)$$

Após a realização do ensaio o valor equivalente da corrente de excitação medida à tensão de excitação especificada pela equação 31 é aplicado à equação 32 e o erro de relação do TC é calculado [5] [9] [10].



Considera-se que um TC para serviço de proteção encontra-se dentro da sua classe de exatidão, quando o erro percentual calculado com a equação 32 não for superior ao especificado para a sua classe [5] [9] [10].

### **3.3 Confiabilidade metrológica**

Genericamente, confiabilidade refere-se à capacidade de um item (produto, processo ou sistema) desempenhar uma função requerida sob condições preestabelecidas em um período de tempo definido [41].

Em um sistema de medição, a confiabilidade metrológica refere-se à capacidade de fornecer resultados de medições confiáveis conforme condições de utilização definidas [5].

Em ambiente industrial, diversos procedimentos deveriam ser aplicados para garantir o correto funcionamento do sistema de medição, em especial nas medições das grandezas que mais influenciam na qualidade do produto.

Segundo [42] a comprovação metrológica integra um conjunto de operações necessárias para assegurar-se de que um dado equipamento de medição está em condições de conformidade com os requisitos para o uso pretendido.

Um dos itens desse conjunto é o relato da incerteza da medição, que deve levar em conta todas as incertezas significativas identificadas no processo de medição [41] [42] [43].

A declaração do resultado de uma medição somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor [43] [41] [44].

De uma forma geral a aplicação do conceito de incerteza de medição em ensaios está ocorrendo relativamente há muito pouco tempo. [44]

Em [45] é apresentado um trabalho sobre confiabilidade de equipamentos utilizados na transmissão de energia elétrica. Trata-se de um acompanhamento estatístico sobre análise de falhas em uma visão geral dos ensaios de recepção e rotina [45].

Em [46] enfatiza-se que a garantia da continuidade do fornecimento de energia elétrica passa pela necessidade de equipamentos e instalações do sistema elétrico apresentarem alta disponibilidade e confiabilidade operativa [46].

Nesse contexto a função manutenção assume um papel estratégico. A necessária disponibilidade e confiabilidade exigem que esses equipamentos passem por adequada manutenção de natureza preditiva. Nesse caso os resultados obtidos em ensaios entram como o meio de garantia dessa confiabilidade [46].

Contudo, nenhuma referência é apresentada sobre a análise das incertezas de medição e sua influência nos resultados dos ensaios realizados.

O que se observa com relação à confiabilidade metrológica nos ensaios de saturação é semelhante ao que ocorre com os demais ensaios de equipamentos da transmissão:

- existe uma preocupação quanto à calibração dos instrumentos de medição, mas os certificados nem sempre são utilizados corretamente, no que refere a aplicação de correções e emprego da incerteza da medição;
- nas referências obtidas de laboratórios que efetuam esse tipo de serviço, constatou-se que os executantes consideram, que, se um instrumento está calibrado, ele está automaticamente apto para realizar a medição, sem necessidade de se questionar quanto à incerteza do mesmo;
- no caso de medições de grandezas elétricas, normalmente se admite uma incerteza de  $1/3$  da tolerância. No ensaio em questão, acredita-se que

incertezas dessa ordem não são significativas na avaliação da conformidade do equipamento;

- é senso comum nos laboratórios que os instrumentos utilizados para medição dessas grandezas estão tecnologicamente bastante avançados no que diz respeito à sua qualidade metrológica;

Nessa situação optou-se por automatizar e avaliar a confiabilidade do ensaio de saturação em função do seguinte cenário observado:

- ensaio integralmente manual;
- ensaio em que descuidos do operador podem levar o TC à saturação;
- ensaio em que a confiabilidade das medições não era assegurada;
- disponibilidade de equipamentos possíveis de automação a custo relativamente baixo;
- grande interesse do laboratório na automação do ensaio.

## **4 REQUISITOS PARA A AUTOMAÇÃO DE BANCADAS DE ENSAIOS**

O segmento da automação seguramente é o que mais cresce, dentro da instrumentação de medição. Principalmente a utilização de bancadas automatizadas tem aumentado de forma bastante significativa [47].

A automação da medição integra vantagens operacionais e metrológicas inerentes às capacidades de aquisição de dados decorrentes do uso do computador associado [48].

O emprego de recursos de processamento, armazenamento e aquisição em tempo real aumentam a confiabilidade metrológica dos processos de medição [47] [48]. A evolução tecnológica tem agregado um custo cada vez mais atrativo à automação [49].

Segundo FLESCH [47], atualmente o custo de uma bancada automatizada, com uso do computador é igual, ou muitas vezes menor, do que o custo empregado a instrumentos convencionais. Isso se deve à possibilidade de compartilhamento de módulos de processamento de sinais, através da multiplexação, ao uso de transdutores mais simples e à eliminação de módulos mostradores, pelo emprego de instrumentos virtuais [50] [51].

Diante da contínua evolução da tecnologia de instrumentação elétrica e das alternativas existentes, é importante conhecer as principais disponibilidades, para desenvolver um projeto de um sistema de aquisição de dados [51] [52] [53].

## 4.1 Sistemas de aquisição de sinais

Um sistema de aquisição de sinais é um conjunto de elementos inter-relacionados, que se coloca entre um processo e seu observador, com o propósito de aquisição, análise e apresentação dos dados sobre o referido processo [54] [55] [56].

O sistema de aquisição de sinais deve, portanto, medir, analisar e validar as informações adquiridas do mundo real. Para tanto, esses sistemas devem apresentar uma arquitetura na qual os elementos se comunicam e se entendem mutuamente, interagindo entre si (figura 10) [54] [56].

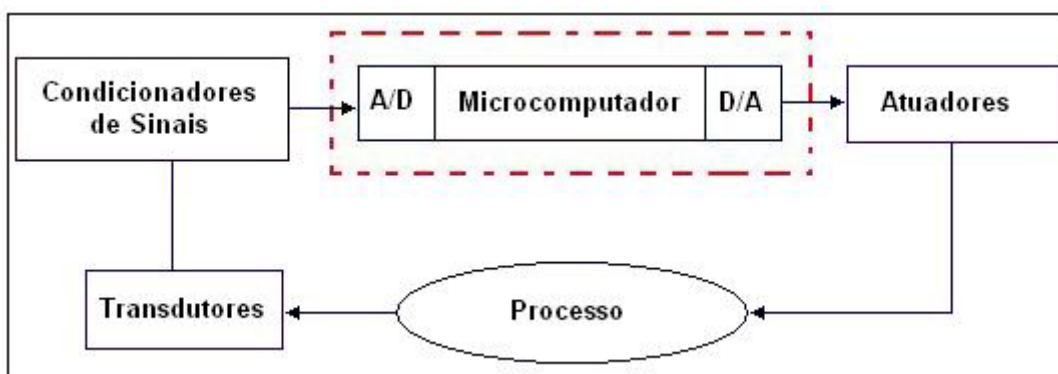
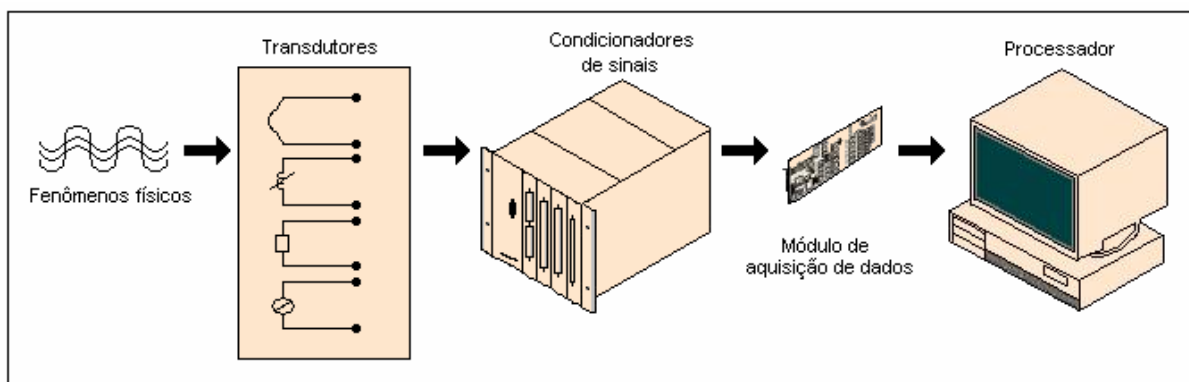


Figura 10: Diagrama em blocos da arquitetura de um sistema de aquisição de sinais

Para uma visão mais próxima da realidade a figura 11 apresenta os elementos típicos do *hardware* de um sistema de aquisição de dados. São eles: transdutores, condicionadores de sinais, módulos de aquisição de dados e processador [54].



**Figura 11: Elementos típicos de um sistema de aquisição de sinais**

### 4.1.1 Transdutores

Transdutores são componentes responsáveis pela transformação do fenômeno que se deseja medir em uma grandeza elétrica, capaz de ser compreendida pelo sistema de aquisição de dados [54] [57].

Segundo o VIM [58] o transdutor é um “dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação determinada com a grandeza de entrada”. O sensor é definido como “elemento de um instrumento de medição ou de uma cadeia de medição que é diretamente afetado pelo mensurando” [58].

Os transdutores podem ser formados a partir de sensores passivos que sofrem variação de algum parâmetro elétrico (resistência, capacitância, indutância) em função da grandeza de medição. Esse tipo de transdutor necessita de excitação externa [57].

Também, podem ser formados a partir de sensores ativos, que geram diretamente um sinal elétrico na forma de corrente, tensão ou carga elétrica [57]. Em [47] propõe-se que para a classificação de transdutores sejam adotados os termos: transdutores auto-geradores e transdutores que requerem alimentação [47].

#### 4.1.2 Condicionador de sinais

Os sinais elétricos gerados por sensores e transdutores devem ser otimizados para a faixa de medição de entrada do conversor analógico-digital (A/D) da placa ou módulo de aquisição do sinal.

Freqüentemente o sinal precisa receber algum tipo de tratamento anterior à conversão A/D. Os condicionadores de sinais realizam essa adaptação para viabilização da medição. As funções mais importantes desempenhadas pelos condicionadores de sinais são apresentadas a seguir [54] [59].

A amplificação é muito utilizada em condicionamento de sinais. Sinais de baixa intensidade, como de termopares por exemplo, devem ser amplificados para melhorar a resolução e a relação sinal/ruído [57]. Para uma maior exatidão, o sinal deve ser amplificado de forma que a máxima faixa de tensão do sinal a ser condicionado coincida com a máxima faixa de tensão de entrada do conversor A/D [55] [57].

Em muitos casos, para a proteção da entrada do conversor A/D, é utilizado o isolamento de sinais. É uma aplicação comum de condicionamento de sinais de transdutores. O sistema a ser monitorado pode conter transientes de tensão elevada que podem danificar o conversor [54] [60].

A isolação pode eliminar ou minimizar efeitos de potenciais de terra distintos entre os sinais de entrada de sistemas de aquisição de dados (DAQs) e os sinais adquiridos (efeito *ground loop*). Essa diferença pode levar a representações erradas na medição, e, no caso de diferenças elevadas, ainda danificar o equipamento [54] [60]. A isolação é destacadamente importante nos ensaios de equipamentos da transmissão de energia elétrica por eles envolverem tensões elevadas.

Uma técnica muito utilizada pra medir diversos sinais com um único dispositivo de medição é a multiplexação. O equipamento de condicionamento de sinais analógicos geralmente provê multiplexação para uso com sinais de variação lenta, como temperatura [43] [55] [57] [59] [60] [62] [63] [64]. Porém, empregando-se multiplexação com chaves semicondutoras, sinais de alta frequência também podem ser multiplexados [56] [61].

Na multiplexação o conversor A/D amostra um canal, troca para o próximo e assim sucessivamente. Para amostrar muitos canais ao mesmo tempo, a taxa de amostragem efetiva de cada canal é inversamente proporcional ao número de canais amostrados [54] [60].

A taxa de aquisição máxima do sistema DAQ para um dado sinal (taxa efetiva) depende da relação entre a taxa de aquisição do sistema e o número de canais utilizados. Por exemplo, um sistema com 1MS/s (um milhão de amostragens por segundo), na utilização de 100 canais fornecerá uma taxa efetiva de 10 kS/s (dez mil amostragens por segundo) para cada canal.

Outro tipo de condicionamento de sinal é a linearização. É utilizada em transdutores que possuem uma resposta não linear às variações das grandezas de medição. Muitos transdutores, como por exemplo, os termopares e os termistores possuem essa característica [43] [54].

A filtragem possui a função de remover sinais indesejados do sinal que se deseja medir. Filtros de ruído - passa baixas - são utilizados para sinais CC, como os que resultam de medidas de temperatura. Eles atenuam as componentes de maior frequência, que em grande parte são responsáveis pela dispersão da medição [54] [65].



Medições de sinais AC necessitam muitas vezes de filtros especiais como *antialiasing filters*. Esse tipo de filtro, também passa baixa, atenua componentes de frequência superior à largura de banda do sinal desejado. Caso não fossem removidas, poderiam aparecer erradamente como sinais dentro da faixa de medição do sistema de aquisição [65].

A excitação é aplicada a transdutores que necessitam de alimentação externa. Extensômetros, termistores e termoresistores, por exemplo, utilizam módulos de condicionamento de sinais que geram a excitação de tensão ou corrente necessária para o seu funcionamento [43] [54] [65].

Medidas com termoresistores são geralmente feitas com uma fonte de corrente que converte a variação em resistência para uma tensão que pode ser medida. *Strain gauges* são dispositivos de baixa sensibilidade, alimentados por uma fonte de tensão e tipicamente usados em ponte de *Wheatstone* [43] [57].

É fundamental conhecer a natureza do sinal, a configuração que está sendo usada na medição e os efeitos que o ambiente causa no sistema. Com base nessas informações pode-se determinar o condicionamento adequado para o sistema de aquisição [54].

#### **4.1.3 Processamento e apresentação de dados**

É interessante que a capacidade de processamento incorporada ao sistema de aquisição dê condições para a análise de dados coletados.

Os softwares dirigidos ao desenvolvimento de aplicativos que empregam a filosofia de instrumentação virtual, como HPVVE, Labwindows e Labview, são formas amigáveis de programação de controle de operação e de aquisição de sinais de instrumentos [66].

O ambiente de programação de aquisição e processamento de sinais mais usual na atualidade é o LabView da empresa National Instruments. Trata-se de um pacote para visualização e análise de dados que permite criar de forma bastante simples e rápida a interface gráfica de acordo com as necessidades [53].

A interface de operação vem a ser o que o fabricante chama de instrumento virtual. Os instrumentos virtuais se caracterizam por painéis apresentados em telas de monitores de vídeo, acessadas pelo usuário. Através do software emula-se o comportamento operacional de instrumentos reais, que são comandados via teclado e *mouse* [47].

O *software* Labview é uma linguagem de programação que permite a aquisição de dados, análise, simulação ou controle de instrumentos e processos. Além disso, ele possui bibliotecas para aquisição de dados, controle de instrumentos via GPIB e serial, analisador de dados e representação de dados [47] [67] [68].

Na versão 7 (atual), também permite o controle via *internet* de instrumentos e processos, além da criação de arquivos auto-executáveis para serem utilizados em computadores que não possuem o software instalado [69] [70].

## **4.2 Estruturas usuais em aquisição de sinais**

Atualmente vários organismos (ANSI, EIA, IEEE, por exemplo) desenvolveram padrões para auxiliar o projeto e desenvolvimento de sistemas de aquisição de sinais. Alguns desses padrões são aceitos mundialmente, e muitos fabricantes oferecem uma grande quantidade de equipamentos compatíveis com tais padrões [70].

Esses padrões definem critérios para controle remoto de instrumentos eletrônicos e para a comunicação destes entre si, através de barramentos ou protocolos de comunicação.

Dentre os mais utilizados para este fim, destacam-se o IEEE-488, VXI e o RS-XXX(RS-232, RS-485, RS-422) [47] [53]. Cada padrão tem suas características, vantagens e desvantagens relacionadas ao tipo de aplicação.

Com a evolução da tecnologia dos conversores A/D e a popularização dos computadores, as placas de aquisição de dados (placa DAQ) têm sido uma excelente alternativa para implementação de sistemas de aquisição. Contudo, as características de um sistema de aquisição de sinais são ditadas pelo processo do qual deseja-se adquirir dados e pelas necessidades do usuário do sistema. Desse modo um conhecimento detalhado dos padrões existentes é indispensável para o projeto de sistemas de aquisição de dados [53].

#### **4.2.1 Instrumentos com interface de comunicação**

Atualmente vários fabricantes equipam seus instrumentos com interface para tipos de barramento que permitem conectar instrumentos programáveis a microcomputadores [52].

Os sistemas de aquisição de dados baseados nesse tipo de instrumento necessitam de equipamentos dotados do mesmo padrão de comunicação para adquirirem os dados desejados [52].

A *Hewlett-Packard* (HP) desenvolveu na década de sessenta o barramento GPIB com o objetivo de controlar sua linha de instrumentos programáveis [71]. Devido à alta taxa de transmissão de dados, da ordem de 1Mbytes/s, este barramento foi rapidamente aceito e se transformou no padrão IEEE 488 – GPIB [71].

Para melhorar sua performance, vários outros padrões foram definidos. Entre eles destaca-se o padrão IEEE 488-1975, desenvolvido dez anos depois do barramento GPIB [71].

Em 1987 o padrão IEEE 488 foi melhorado e passou a ser denominado ANSI/IEEE 488.2. Este novo padrão proporcionou uma maior facilidade de comunicação com os instrumentos, estabeleceu um protocolo de comunicação baseado em trocas de mensagens (SCPI), e resolveu o problema da padronização de comandos [71] [72].

Para melhorar a interface com o usuário de sistemas de medição baseados em GPIB, vários fabricantes criaram pacotes gráficos de alto nível como o LabWindows, LabVIEW, Measure e Asystant GPIB. Esses pacotes vêm acompanhados de bibliotecas de interfaces, que incorporam comandos apropriados para cada instrumento [71] [73].

Outro tipo de comunicação bastante usual na transmissão de dados de um computador para um periférico, como uma impressora, uma plotadora ou um instrumento programável é a comunicação serial. Ela é encontrada nos padrões: RS-232, RS-422, RS-485 e USB [74].

O padrão RS-232 permite um tipo de comunicação ideal para transferência de dados, em baixas taxas e distâncias de até 10 m. A sua limitação é a possibilidade de comunicação com apenas um dispositivo. Para acomodar vários dispositivos é necessário o uso de uma placa com portas seriais múltiplas ou uma porta multiplexada [74].

O padrão RS-422 é o padrão serial encontrado nos computadores *Macintosh*. Usa um sinal elétrico diferencial, ao contrário do padrão RS-232, cujo sinal possui referência ao terra. A taxa de transmissão utiliza duas linhas para cada um dos

sinais de envio e de transmissão. Por isso, possui uma maior imunidade a ruído e permitiu aumento no comprimento máximo entre os dispositivos seriais. Além disso, esse padrão suporta até 10 dispositivos seriais conectados a uma única porta [74].

O padrão RS-485 é um melhoramento do padrão RS-422. Permite um número máximo de 32 dispositivos e define as características elétricas necessárias para garantir os níveis de tensão adequados durante a conexão, que pode chegar até 1000 m de distância. Com esse padrão podem-se criar redes complexas de dispositivos com uma porta serial única. É um padrão bastante usual em controle de processos industriais [74].

O padrão USB (*Universal Serial Bus*) é uma tecnologia recente que tem substituído a antiga RS-232. Esse padrão foi projetado inicialmente para o controle de dispositivos periféricos, tais como teclado e mouse. Entretanto, se mostrou útil para muitas outras aplicações, inclusive a automação da medição. O padrão USB possui as características de auto detecção e configuração dos dispositivos *plug and play* e permite a conexão de até 127 dispositivos por ponto [73] [74].

#### **4.2.2 Sistemas modulares ou bastidores**

Sistemas modulares são utilizados quando as grandezas medidas demandam uma velocidade elevada na aquisição de dados, grande quantidade de medições e alta capacidade de processamento [52].

Esses sistemas são compostos de várias placas de aquisição de dados controladas por uma placa conectada ao computador dedicada exclusivamente ao controle do funcionamento dessas. Utilizam um barramento de interconexão desenvolvido especificamente para essa função [52]. Assim, o computador fica com a função de trabalhar com os resultados já processados pela placa de controle do sistema [52].

O sistema de aquisição de dados é montado em um gabinete específico. Contém as placas de aquisição, barramento de conexão e processador dedicado. É interligado ao microcomputador através de uma das interfaces computacionais [52].

Existem diversos tipos de sistemas com estas características, mas a maioria dos fabricantes segue algum padrão para que componentes com diferentes procedências possam ser compatíveis entre si [75].

A plataforma VXI *plug and play* reúne uma grande quantidade de produtos para aquisição de dados de diferentes fabricantes, mantendo a compatibilidade entre eles. Tal compatibilidade é garantida devido a especificações mecânicas, elétricas e lógicas para interligação dos componentes [75] [76].

Outro tipo de sistema modular é a plataforma PXI. É uma arquitetura baseada no barramento PCI (PXI = PCI *eXtensions for Instrumentation*). Combina as características elétricas do barramento PCI, amplamente difundidas pelo seu uso em qualquer PC, com as características mecânicas e modulares do CompactPCI [75] [76].

A plataforma PXI integra barramentos de sincronização especializados e características específicas de software tornando-se uma plataforma de alto desempenho e custo relativamente baixo para sistemas de medição e automação [75] [76].

#### **4.2.3 Placas de aquisição de dados**

As placas de aquisição de dados (placa DAQ) efetuam a digitalização de valores dos sinais analógicos – geralmente tensão - e transfere a informação digital para o computador. As placas são ligadas diretamente aos barramentos internos do computador, conferindo boa velocidade na troca de dados [54]. Desta forma, a placa

DAQ possui as mesmas condições de acesso de outros componentes do sistema como controladores de vídeo, memória, disco, etc.

Além da digitalização de tensões, comumente os fabricantes incluem outras funções como saídas de sinais analógicos, entradas e saídas digitais, temporizadores e contadores [54].

As especificações de entradas analógicas fornecem informações sobre as características e a exatidão do sistema de aquisição de dados. As especificações básicas informam o número de canais, a taxa de amostragem, a resolução e as faixas de medição [54]. O número de canais de entradas analógicas de uma placa DAQ é especificado pela configuração dessas entradas. A configuração do sistema depende completamente da sua aplicação e do tipo de sinal a ser medido [60].

Na maioria dos sistemas de aquisição deve-se escolher na configuração das entradas analógicas entre: *single-ended ground referenced* (RSE), *single-ended ground nonreferenced* (NRSE) ou *diferenciais* (DIFF) para todo o grupo de canais analógicos [60].

A diferença entre os esses tipos de configuração está no uso do terminal negativo do sinal. Na configuração RSE o terminal negativo do amplificador diferencial não é utilizado; todos os canais compartilham um terra comum. Essas entradas são tipicamente usadas quando os sinais são de alto nível (maior que 1 V). A distância entre a fonte de sinal ao hardware de entrada analógica devem ser pequenas (por exemplo, menores que 3 m) [60] [77].

Se os sinais não se encaixam nesses critérios, deve-se utilizar as entradas diferenciais. No modo diferencial os dois terminais do amplificador são utilizados. Cada entrada tem sua própria referência e os erros causados por ruídos são reduzidos [54] [60].

A taxa de amostragem é o parâmetro que determina a frequência com que as conversões são realizadas. Uma taxa de amostragem muito alta adquire mais dados num tempo determinado e pode, portanto, gerar uma representação do sinal mais próxima do original [54] [77]. Esse parâmetro é medido em amostras por segundo (samples per second, samples/s).

Para digitalizar o sinal de maneira apropriada o teorema da amostragem (teorema de Nyquist) deve ser respeitado [54]. Ele diz que, “a frequência de amostragem deve ser no mínimo duas vezes a frequência máxima contida no sinal”. Ou seja, a taxa de amostragem deve ser no mínimo duas vezes mais rápida que a componente de frequência mais alta do sinal a ser coletado. Por exemplo, uma medição que precisa de um sinal de 1 kHz deve possuir uma taxa de amostragem mínima de 2 kHz [54]. Na prática, para que se garanta boa exatidão, relações de 10 vezes, ou até mais, são necessárias.

A faixa de conversão ou faixa de medição (FM) desses sinais é determinada pelos níveis de tensão máximo e mínimo que o conversor pode quantizar [54]. A exatidão da conversão é dependente da resolução, linearidade do conversor, ganho (G) e erros de offset do amplificador de entrada [54].

Algumas placas DAQ oferecem faixas de medição e ganhos selecionáveis. Os ganhos determinam diferentes níveis de tensão para as faixas de conversão e conseqüentemente a resolução do conversor A/D [54].

A resolução e o ganho disponíveis determinam a tensão mínima que o conversor pode detectar. A resolução pode ser determinada pela equação (33):

$$\frac{FM}{G \times 2^{n^{bits}}} \quad (33)$$

Onde: FM – faixa de medição



G – ganho utilizado

### **4.3 Escolha da estrutura adequada**

Os requisitos básicos identificados para a automação do ensaio de saturação foram: duas entradas analógicas para a medição das grandezas com uma taxa de aquisição compatível com a frequência máxima de 60 Hz e 5 bits de entradas e saídas digitais para controle e comando da fonte de tensão.

A escolha da melhor estrutura a ser utilizada passa por uma análise das estruturas apresentadas nesse capítulo, considerando os requisitos básicos identificados e os recursos disponíveis no laboratório de implementação.

A evolução da tecnologia de conversão A/D e de acessórios de condicionamento tornaram o uso das placas DAQ uma das opções mais populares para sistemas de instrumentação.

Sistemas baseados em barramentos IEEE 488 e VXI são geralmente utilizados para medições mais sofisticadas. Por outro lado, para uso em sistemas de aquisição de dados mais simples existem os sistemas baseados em instrumentos que se interligam através de algum protocolo de comunicação serial, também muito populares.

Para a escolha da configuração utilizada no projeto de aquisição de dados, no mínimo três pontos devem ser observados: a meta a ser alcançada, a necessidade de integração com outros sistemas e os benefícios que cada configuração traz para a aplicação.

Deve-se visualizar se o sistema a ser desenvolvido irá se integrar com um já existente, ou se, haverá no futuro necessidade de ampliações. Deve-se estar atento de que as tecnologias podem ser mescladas para a criação de diversas configurações.

Por exemplo, pode-se construir um sistema apenas com instrumentos VXI's, ou integrá-los com instrumentos GPIB, ou ainda, integrar instrumentos VXI's com GPIB's e com placas DAQ.

Um resumo das principais características de cada tecnologia descrita nesse capítulo é apresentado como forma de facilitar decisões associadas às vantagens e desvantagens que elas podem oferecer a um determinado sistema em questão.

- IEEE 488 – Larga faixa de aceitação e compatibilidade com grande quantidade de instrumentos e fabricantes; projetado para controle remoto de instrumentos programáveis; controla até 14 instrumentos; taxas de transferência acima de 1Mbytes/s.
- Placas de aquisição – Combina baixo custo com desempenho moderado; Instalada diretamente no barramento do PC; transfere dados diretamente para a memória do PC; resolução de 8 a 16 bits; taxa de amostragem pode chegar acima de 1 MHz; conversão A/D, D/A; operações de temporização; entradas e saídas digitais.
- Comunicação serial – Controle remoto serial para instrumentos simples; usual para longas distâncias; usual para controle remoto de subsistemas de aquisição de sinais; a maioria dos computadores possui uma interface RS-232; grande quantidade de instrumentos disponíveis.
- Barramento VXI – Padrão mundialmente aceito desde 1987; instrumentos sofisticados e de alto desempenho; componentes modulares; compatível com padrões VME e IEEE 488; alta velocidade de compartilhamento de memória; alto custo.

Para a automação do ensaio de saturação em TC adotou-se uma estrutura trivial em automação laboratorial que utiliza uma placa de aquisição de dados controlada via software LABVIEW por um PC.

Além das características e vantagens descritas até agora sobre os sistemas de aquisição de sinais baseados em placas DAQ, outros fatores foram levados em consideração:

- quanto à aplicação, as grandezas envolvidas no ensaio oferecem a facilidade de se dispor de sinais já pré-tratados - não necessitam de várias unidades de condicionamento e processamento de sinais para justificar o uso de bastidores;
- os sinais a serem adquiridos estão na frequência industrial de 60 Hz. Por isso, não necessita de um sistema com alta taxa de aquisição;
- os níveis de incerteza da medição exigidos pela aplicação não são grandes.

A disponibilidade de entradas e saídas digitais permite a comunicação de informações binárias ou pulsos diretamente ao sistema de aquisição de dados, o que permite exercer as funções de controle e comando necessárias para o projeto.

As placas DAQ oferecem também escalabilidade, o que caracteriza a possibilidade de futuras expansões e *upgrades* sem perder investimentos já realizados. Isso se deve a sua plataforma aberta, que permite integrações com sistemas futuros.

Sobre expansões futuras, verifica-se ainda, que a necessidade de expansão do sistema com emprego de transdutores especiais, não compatíveis com placas DAQ, é muito remota.

As placas de aquisição são de baixo custo. Apresentam facilidade de operação e de manutenção também a baixo custo sob forma de substituição.

## **5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DO ENSAIO**

O sistema de automação do ensaio de saturação em transformadores de corrente (TC) foi estruturado para o método de levantamento da curva de magnetização. Conforme descrito no capítulo 3, esse método permite verificar as características magnéticas do núcleo, bem como avaliar a exatidão dos enrolamentos de proteção do TC.

O procedimento de ensaio, em sua forma tradicional, consiste na aplicação de tensão alternada variável ao secundário do TC, através de uma fonte que é controlada manualmente. A cada degrau de tensão ou corrente pré-definido é realizada uma interrupção para a medição e registros de ambas as grandezas. A medição é feita com instrumentos de bancada - voltímetro e amperímetro. Os dados são registrados manualmente em folha de ensaio. Os registros são posteriormente transferidos para o programa Excel no qual é gerada a planilha de resultados [38] [39].

### **5.1 Estrutura do sistema de automação do ensaio**

É necessário integrar a estrutura de aquisição de sinais adotada, justificada em 4.3, aos módulos que irão compor o sistema de automação do ensaio. Diante disso, iniciou-se um processo de análise de todos os itens que compõem o circuito de ensaio.

Foi preciso conhecer o funcionamento da fonte de tensão e criar um meio de integrá-la ao novo sistema, sem perder suas características funcionais anteriores.

Para isso, desenvolveu-se um circuito de acionamento com o devido isolamento entre as chaves de atuação da fonte e a placa de aquisição.

Foram escolhidos transdutores para a medição das grandezas envolvidas. A escolha teve como base a compatibilidade necessária entre a faixa de medição e a faixa de entrada da placa de aquisição.

Também, foi necessário adequar as especificações mínimas necessárias para a implementação do projeto, com os recursos disponíveis no laboratório onde foi realizada a dissertação.

Foi desenvolvido um programa em *LabView* que realiza as funções desejadas com uma interface de operação funcional e amigável para o operador. A apresentação dos dados é realizada conforme normatização [10] [11].

O armazenamento dos registros é feito em interface gráfica do programa Excel. O Excel é ferramenta de uso contínuo do laboratório em questão, para registro e análise dos resultados do ensaio.

Para a realização prática foi preciso definir o modo de interligação entre todos os módulos do sistema e o funcionamento desejado. A descrição detalhada do desenvolvimento do *hardware* apresenta todos os itens e condições analisadas para a implementação do projeto.

## **5.2 Descrição do *hardware* desenvolvido**

A concepção do *hardware* para o sistema de automação pode ser dividida em quatro blocos funcionais que se interligam na realização do ensaio, conforme apresenta o diagrama de blocos da figura 12. Esses blocos representam as seguintes funções:

- configuração da placa de aquisição de dados;

- redução da amplitude dos sinais envolvidos a uma faixa compatível com a placa de aquisição;
- circuito de acionamento da fonte e isolamento com a placa DAQ;
- interface de operação e tratamento dos dados.

O processo de análise e desenvolvimento utilizado na integração, configuração e especificação desses blocos são descritos e detalhados nesta seção.

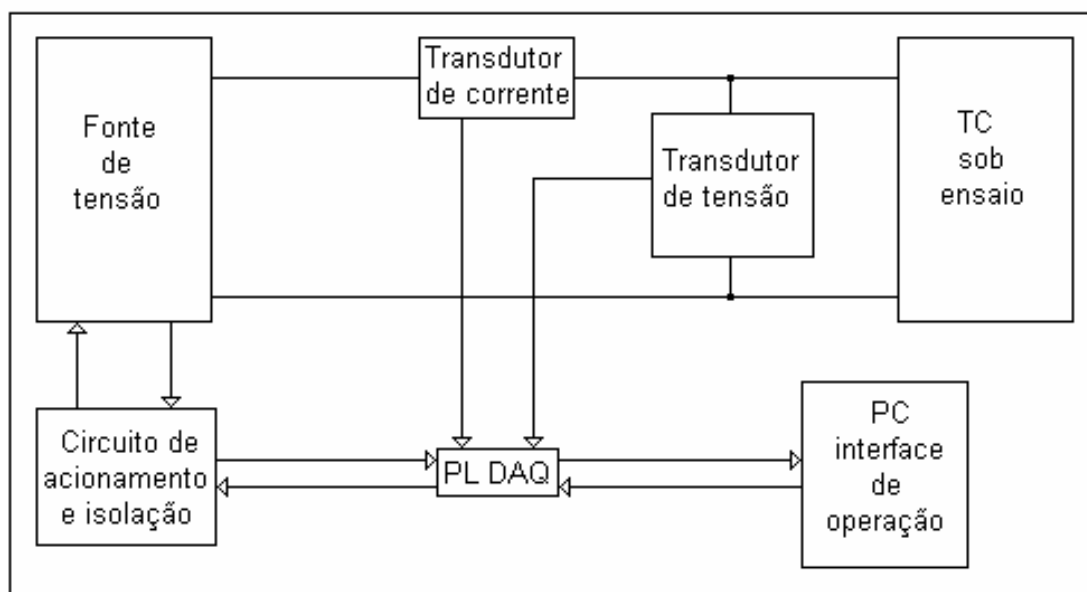


Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de automação do ensaio de saturação em TC

### 5.2.1 Placa de aquisição

A placa de aquisição adquirida para este projeto é um dispositivo da *National Instruments* modelo 6024-E. Trata-se de uma placa PCI de 12 bits com 16 canais de entradas analógicas na configuração RSE e NRSE ou 8 canais na configuração DIFF. Possui 2 canais de saídas analógicas, 1 byte de entradas e ou saídas digitais e canais para funções de *timer* e *trigger* [77].

Todos os atributos disponíveis nesse dispositivo são configurados pelo *driver-software* NI-DAQ, que promove a integração entre o *hardware* e o *software* de desenvolvimento, nesse caso o *Labview* [77].

Dos recursos da placa de aquisição foram utilizadas as entradas analógicas e as entradas e saídas digitais. As funções adicionais poderão ser utilizadas no futuro em diversas aplicações no laboratório ou mesmo para aprimoramento e extensão do sistema desenvolvido.

Duas entradas analógicas foram destinadas à medição da tensão e da corrente de excitação. Elas foram configuradas em modo diferencial devido às características do sinal e posicionamento dos itens de ensaio no laboratório.

A configuração diferencial garante uma melhor confiabilidade das medições para sinais flutuantes (sem referência de aterramento) transmitidos a longas distâncias [60]. Esse é o caso dos sinais vindos dos transdutores, cuja disposição no circuito de ensaio exigiu a utilização de cabos de 10 m para a medição da corrente e 20 m para a medição da tensão.

A taxa de aquisição para o grupo de entradas analógicas é de 200 kS/s. Nesse caso obtém-se 100 kS/s para cada um dos dois canais utilizados. A faixa de medição máxima, para cada canal, é de (-10 a +10) V. Ganhos programáveis, via software, permitem a variação dessa faixa para obter uma melhor resolução na medição de sinais de baixa intensidade.

A placa DAQ 6024E possui um byte de entradas ou saídas digitais que pode ser configurado como porta (byte inteiro) ou como linhas (bit a bit). Esse recurso foi destinado ao controle da fonte de tensão.

A porta digital foi configurada para funcionar em linha. Três linhas foram configuradas para leitura do estado das seguintes chaves de posição da fonte: fim de curso superior, fim de curso inferior e disjuntor de tensão. E, duas linhas foram configuradas para enviar os comandos de elevar e reduzir a tensão no controle da fonte.

Todas as linhas digitais possuem internamente um resistor de 50 k $\Omega$  em configuração *pull-up* ligado a uma fonte de tensão contínua (CC) de 5 V. Essa configuração mantém as linhas digitais naturalmente em nível lógico positivo.

Na descrição do circuito de controle da fonte de tensão, item 5.2.3, poderá ser observado que essa configuração influenciou diretamente na forma de controle utilizado, bem como, exigiu cuidados na aplicação das linhas de saída.

### **5.2.2 Medição da corrente e tensão**

Para a medição da corrente e da tensão foi necessário especificar transdutores compatíveis com as faixas de medição do ensaio e da entrada da placa DAQ.

A tensão alternada (CA) aplicada ao secundário do TC durante o ensaio possui uma faixa de variação, em valor eficaz, de (0 a 1860) V. A entrada analógica da placa de aquisição possui um conversor A/D de 12 bits e uma faixa de medição máxima de (-10 a +10) volts de pico.

Dentre os transdutores disponíveis nas instalações do laboratório optou-se pela utilização de dois transformadores redutores de tensão. Usou-se dois, devido à dificuldade de se encontrar, até mesmo no mercado, um transformador que atingisse toda a faixa desejada.

O conjunto de transformadores é composto por um primeiro, conectado diretamente ao secundário do TC, com uma relação de 2200 V para 220 V (TP<sub>1</sub>) e um segundo entre a saída do primeiro e a placa DAQ, com relação de transformação de 220 V para 6 V (TP<sub>2</sub>).

O conjunto apresenta uma relação de redução aproximada de 322,58 conforme calibração (item 6.2.2.1). A faixa de variação da tensão na fonte, observada em experiências práticas realizadas no decorrer deste trabalho,



compreende valores de (2 a 1650) V, o que resulta em uma faixa de medição aproximada de 6 mV a 5,12 V.

A corrente de excitação gerada durante o ensaio de saturação varia aproximadamente de 10 mA a 10 A. Não é comum encontrar transdutores de corrente no mercado que apresentam uma boa linearidade, com a mesma exatidão, em uma larga faixa como essa.

A divisão de manutenção e ensaios, da qual o laboratório em questão é integrante, costuma desenvolver transdutores de corrente próprios para suas aplicações. Normalmente esses são destinados à medição de correntes na ordem de alguns ampères. Neste trabalho foi utilizado um desses transdutores de corrente desenvolvidos pela referida divisão.

Tal transdutor é um transformador de corrente em formato alicate com sensibilidade de aproximadamente 100 mV/A. Os resultados da sua calibração apresentadas em 6.2.2.2 mostrou uma boa linearidade em toda a faixa e uma incerteza compatível com a incerteza máxima admitida para o ensaio.

### **5.2.3 Controle da fonte de tensão**

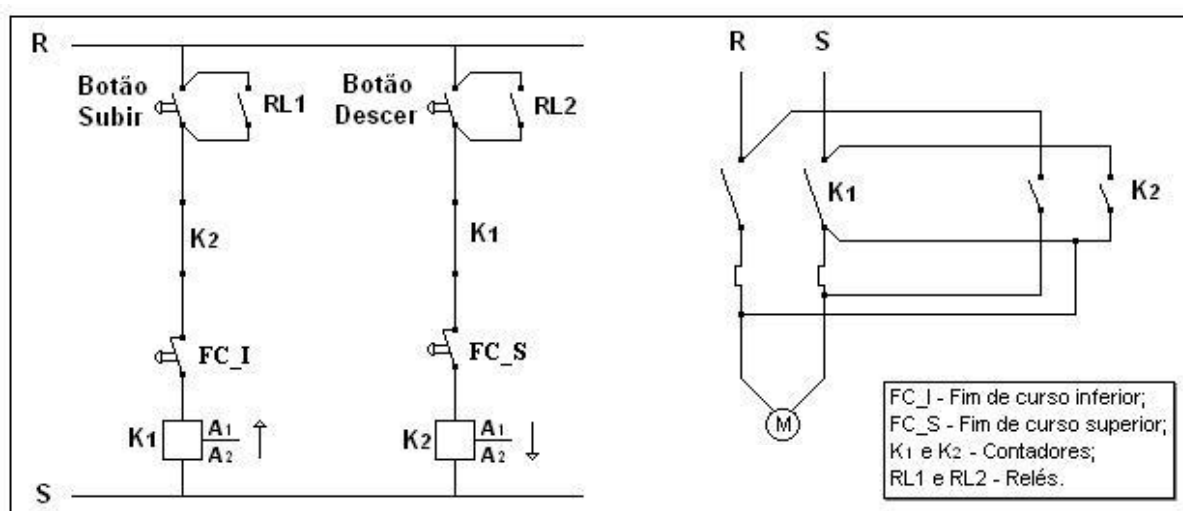
A fonte de tensão utilizada é um autotransformador com um eixo variável, controlado por um motor. O eixo movimenta-se sobre quatro colunas de espiras interligando-as de forma a somar suas tensões e correntes, o que permite fornecer em sua saída uma tensão AC variável de (0 a 450) volts, em até 375 A.

A alimentação tanto para fonte como para o motor provém da rede elétrica de 220 V; 60 Hz. Seu acionamento manual se dá através de uma botoeira com um botão para cada sentido.

Os botões acionam independentemente dois contatores interligados entre si que ligam o motor e impedem o acionamento simultâneo nos dois sentidos. É de

interesse que o circuito de acionamento manual continue operante e que a fonte possa ser facilmente utilizada para outras funções.

A solução adotada foi utilizar relés em paralelo com as botoeiras para permitir o acionamento automático da fonte sem interferir no seu funcionamento manual (figura 13). As características dos relés possibilitam interligar tensões da ordem de 220 V; e correntes de 5 A, conforme requer a aplicação.



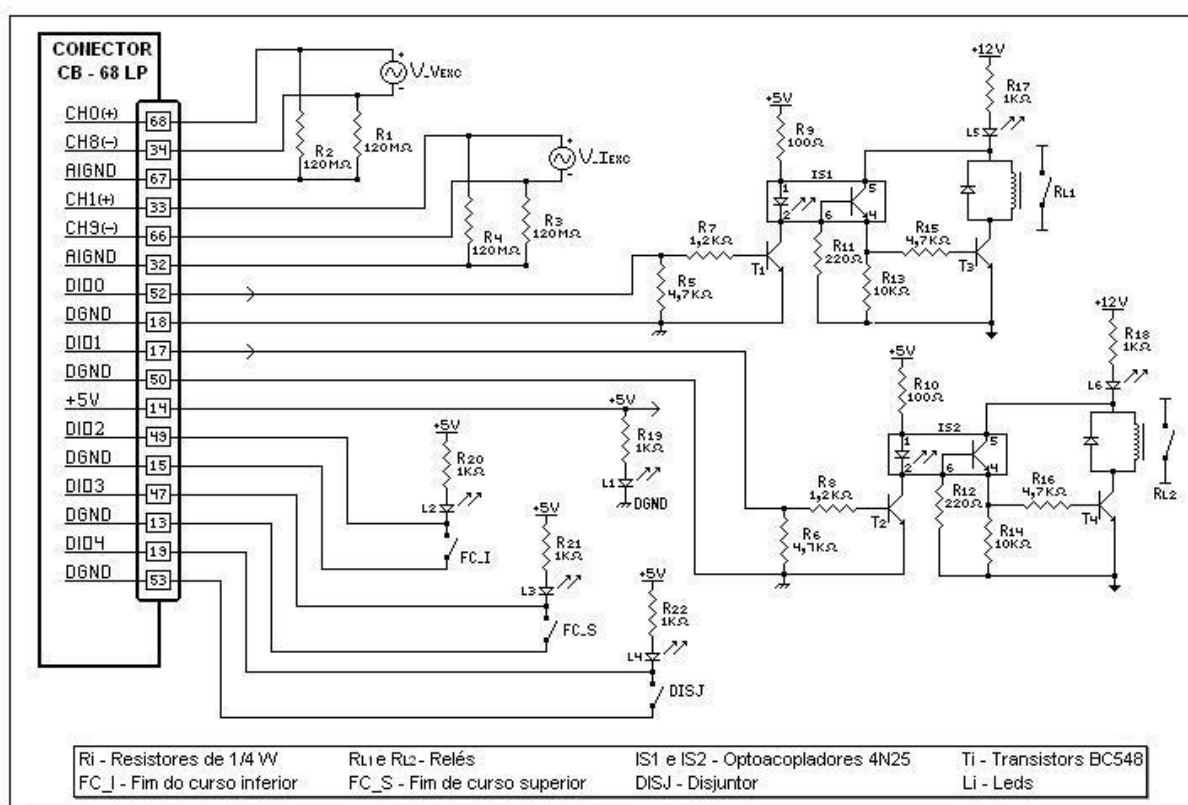
**Figura 13: Diagrama de comando e potência da fonte de tensão AC variável**

Para a atuação dos relés via placa DAQ desenvolveu-se dois circuitos idênticos em uma configuração típica de transistores operando com saturação forçada (figura 14). A operação dos transistores de saída  $T_3$  e  $T_4$  permite a energização da bobina dos relés quando um sinal é aplicado na base dos transistores de entrada  $T_1$  e  $T_2$ .

Para um controle mais fino o sinal aplicado à base de  $T_1$  e  $T_2$  é enviado em forma de pulsos. Os pulsos são gerados por uma subrotina do programa de controle e substituem a utilização do sinal lógico contínuo normalmente fornecido pelas saídas digitais.

A configuração padrão interna das saídas digitais as mantém naturalmente em nível lógico positivo na ausência de comandos sobre a mesma. Essa característica não se mostrou interessante nessa aplicação. Com o circuito de acionamento conectado diretamente à linha digital, teria-se sempre um sinal positivo na linha, acionando indevidamente o relé.

Para resolver esse problema acrescentaram-se os resistores R5 e R6 entre cada linha de saída digital e o terra (GND). Esses foram calculados para inverter a configuração para nível lógico negativo e garantir que as saídas estejam sempre desativadas exceto quando um pulso é enviado.



**Figura 14: Circuitos de acionamento da fonte de tensão, isolamento, chaves de posição e conexão com o pente de bornes da placa DAQ**

As chaves da fonte de tensão não podem ser acionadas diretamente pela placa de aquisição. É necessário um adequado isolamento para sua proteção. Para isso utilizou-se os optoacopladores IS1 e IS2 de modelo 4N25 [78]. Esse

componente foi inserido no circuito de forma a isolar a parte digital da parte analógica e proteger a entrada da placa DAQ (figura 14).

Duas chaves de fim de curso na fonte indicam a posição do eixo nos limites mínimo e máximo de tensão e uma outra chave conectada ao disjuntor indica a presença de tensão na saída a fonte.

Para receber os sinais da fonte pelas entradas digitais aproveitou-se a configuração padrão da placa DAQ. As chaves FC\_I, FC\_S e DISJ foram inseridas entre a saída digital e o DGND da placa DAQ (figura 14).

O acionamento das chaves ocorre em lógica negativa para indicar chave fechada e lógica positiva para indicar chave aberta. Uma sinalização local foi adicionada em série com essas chaves através de *leds* (figura 14).

### 5.3 Descrição do software

O LabView é um ambiente de desenvolvimento, que utiliza uma linguagem de programação gráfica com a qual programas são criados na forma de diagramas de blocos [54] [67]. Assim como outros diversos ambientes de programação possui ferramentas para depurar os programas, como *breakpoints* e execução passo a passo.

Os programas em LabView são chamados de virtual instruments (VI), pois, sua aparência e funcionamento se assemelham muito aos instrumentos reais. Entretanto, VI são similares a funções das linguagens de programação convencionais[54][67].

Um VI é constituído por uma interface interativa que pode conter gráficos, botões e outros controles e indicadores; um diagrama de blocos que representa o código fonte; e, por um ícone o qual permite que o VI se torne uma rotina ou função

de outro programa. Um VI que funciona como uma rotina ou função de outro VI é chamado subVI [54] [67] [68].

O Labview possui duas telas de trabalho, chamadas de painel frontal (*front panel*) e diagrama de blocos (*block diagram*). No diagrama de blocos é desenvolvida a programação. No painel frontal é criada a interface de operação [54] [67].

O programa desenvolvido para o ensaio de saturação em TC se constitui de quatro módulos de programação. A interface de operação, desenvolvida no painel frontal, representa para o usuário quatro janelas de operação com funções distintas. Porém, para o programador, cada janela representa no *block diagram*, todo o desenvolvimento necessário para aquisição, processamento, apresentação, armazenamento e controle dos dados envolvidos no processo.

### **5.3.1 Módulos de interface de operação.**

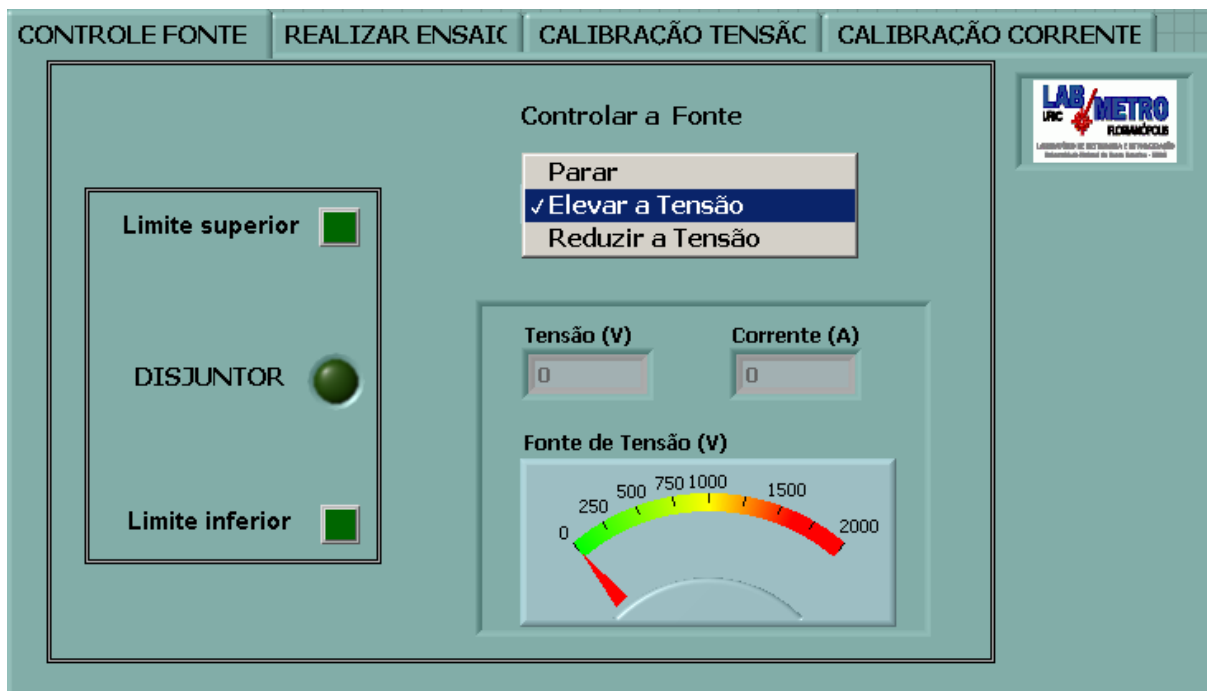
O programa de automação do ensaio de saturação possui uma interface de operação principal na qual quatro janelas distintas são acessáveis via *mouse*. Alias, o *mouse*, é o dispositivo que permite a integração do operador com qualquer caixa ou botão de entrada no sistema.

A primeira janela, denominada CONTROLE FONTE, foi desenvolvida para permitir o controle automático da fonte de tensão independente da realização do ensaio (figura 15). Ela possui sinalizadores virtuais que indicam o estado dos fins de curso superior e inferior, e do disjuntor da fonte de tensão. Permite o controle da fonte através de um botão, tipo caixa de seleção, onde podem ser acionados os comandos *Elevar a tensão*, *Reduzir a tensão* e *Parar*.

Essa janela possui dois indicadores de medição, que apresentam respectivamente os valores da tensão e da corrente eficazes dos transdutores. Um

mostrador analógico, tipo “VU”, auxilia na visualização da tensão e oferece ao operador uma noção instantânea da medição.

Esse módulo funciona como uma interface simples para verificação e controle, na qual os dados são mostrados em tempo real, ponto a ponto, e, sem qualquer tipo de armazenamento ou processamento mais elaborado.



**Figura 15: Módulo de operação - CONTROLE FONTE**

A segunda janela de interface (figura 16) foi desenvolvida para a realização do ensaio de saturação em TC. Ela possui campos de entrada para o registro das especificações do TC sob ensaio e determinação dos limites de controle. Esses dados, juntamente com o estado da fonte de tensão em seu limite inferior, caracterizam as condições necessárias para início do ensaio. Na ausência de algumas das condições, uma mensagem alerta o operador para verificar o que aconteceu.

A janela possui dois botões: INICIAR e PARAR, ambos com tipo de contato momentâneo. O botão INICIAR só é liberado quando as condições iniciais são satisfeitas. Ele se refere exatamente ao início do ensaio.

O botão PARAR pode ser acessado a qualquer momento. Seu acionamento gera um procedimento de segurança, que é semelhante ao executado quando algum limite de controle do ensaio é atingido.



**Figura 16: Módulo de interface – REALIZAR ENSAIO**

Três dispositivos indicadores apresentam, ponto a ponto, os valores eficazes da tensão e da corrente, e da tensão de pico medidos durante o ensaio. Esses dados são adquiridos, processados e armazenados conforme descrito no item 5.3.2.

O indicador gráfico apresenta a curva de magnetização do núcleo. Ela é gerada em tempo real durante o ensaio. O botão de entrada Zerar dados permite

limpar os dados na tela e no arquivo temporário de registro para realização do próximo ensaio.

As outras duas janelas foram desenvolvidas para uma calibração parcialmente automatizada das cadeias de medição. Sua função mostrou-se de grande utilidade no controle da garantia da confiabilidade do sistema.

Denominadas de CALIBRAÇÃO TENSÃO (figura 17) e CALIBRAÇÃO CORRENTE, possuem elementos e procedimento de realização idênticos, tendo como única diferença os valores nominais adotados para a calibração.

CONTROLE FONTE REALIZAR ENSAIO CALIBRAÇÃO TENSÃO CALIBRAÇÃO CORRENTE

Realizar medição

1ª medição

Ponto nominal

Objeto Sob Calibração - OSC

OSC_1 (V)	OSC_2 (V)	OSC_3 (V)
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000

Sistema de Medição Padrão - SMP

SMP_1 (V)	SMP_2 (V)	SMP_3 (V)
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000

Zerar dados de calibração

Enviar dados para o Excell

Figura 17: Painel frontal calibração da tensão

Os blocos de entrada referentes ao Objeto Sob Calibração – OSC apresentam os valores medidos pela cadeia sob calibração. O botão *Realizar medição* permite a aquisição via placa DAQ do valor aplicado pela fonte padrão.



A caixa de seleção *Ciclo de medição* direciona a coluna de entrada do valor medido. O ponto nominal sob calibração é obrigatoriamente selecionado em ordem crescente para o 1º e 3º ciclo e, ordem decrescente para o 2º ciclo.

A tabela referente ao Sistema de Medição Padrão – SMP é composta de blocos de entrada externos. Os valores correspondentes ao indicado no medidor de referência utilizado na calibração são passados manualmente para esses blocos, de acordo com a seqüência dos ciclos de medição.

### **5.3.2 Aquisição, processamento e armazenamento de dados**

Para definir a taxa de amostragem da aquisição dos sinais, bem como a quantidade de pontos de cada amostra, foi necessário analisar as características do sinal desejado e a utilização da fonte de tensão em um processo sem interrupções.

Os dados necessários para a realização do ensaio de saturação e avaliação dos resultados exigem a medição de valores eficazes do sinal. Porém, para se obter um valor eficaz confiável é importante estabelecer que a aquisição seja realizada em períodos completos do sinal.

A fonte de tensão AC leva aproximadamente 25 s para percorrer toda a sua faixa, desde o fim de curso inferior ao fim de curso superior. Isso corresponde a um  $\Delta V \cong 18 \text{ V/s}$ , na faixa de operação de (0 a 450) V.

Em observações práticas constatou-se que essa variação não é constante. O espaçamento entre as espiras da fonte não é contínuo e o posicionamento das escovas sobre as mesmas não garante degraus contínuos de tensão.

Devido a não linearidade da fonte, sua forma de controle foi estabelecida em pulsos, o que proporciona um controle mais fino do que um sinal continuamente atuante na chave.

Para a aquisição dos sinais da tensão e corrente foi realizada a seguinte análise. Com dois canais em uso, tem-se uma taxa de amostragem de 100 kS/s por canal, ou seja, a cada 1 s é possível adquirir 100.000 amostras.

Um período do sinal medido de 60 Hz corresponde aproximadamente a 16,7 ms. Logo, a medição de 1 período nessa taxa de aquisição corresponderá a uma amostra de 1667 pontos. Isso equivale, para essa aplicação, ao menor intervalo válido de medição, no que se refere à velocidade de aquisição.

Quanto menor o intervalo entre uma medição e outra, melhor será a resposta do sistema nas situações limites de controle. Na operação manual da fonte esse controle fino é praticamente impossível. Assim, foi definido trabalhar na taxa de aquisição natural de 100 kS/s, com amostras de 1667 pontos a cada aquisição. Esse processo é contínuo dentro dos ciclos de medição do programa.

Devido à larga faixa de medição utilizada, foi implantada uma rotina para seleção de ganhos variáveis ao longo da faixa. A cada aquisição de um período do sinal, o valor medido em rms é comparado com faixas pré-estabelecidas, e, de acordo com o seu enquadramento em uma das faixas o ganho ideal é selecionado. Após a seleção é realizada uma nova medição, com o ganho ideal, a qual vai ser utilizada no processo.

Essas faixas foram definidas empiricamente, porém equivalem aproximadamente ao valor eficaz calculado para o valor de pico correspondente à faixa de medição de cada ganho. Essas faixas estão apresentadas na tabela 10, capítulo 6.

O ganho selecionado para cada ponto medido é armazenado para uma posterior seleção das respectivas componentes de incerteza no cálculo do erro máximo introduzido pela entrada analógica ao resultado da medição. Esse erro faz

parte da composição da incerteza total da medição, o qual é calculado para cada ponto e armazenado junto com seu valor de origem em um *array* de registro de dados.

Os resultados das medições e sua incerteza associada, processados e registrados durante o ensaio, permanecem armazenados até o botão zerar dados ser acionado. Isso ocorre mesmo se o programa for fechado e o computador desligado.

Ao fim de cada ensaio ou interrupção do mesmo ocorre uma rotina de transferência dos registros. Uma planilha padrão armazenada em um diretório específico é chamada. Essa planilha contém uma macro que é executada na sua abertura. Os dados são transferidos do LabView para o Excel. A macro os distribui na planilha de forma estruturada e gera o gráfico logarítmico da curva de saturação do TC ensaiado.

## **5.4 Procedimento de realização do ensaio**

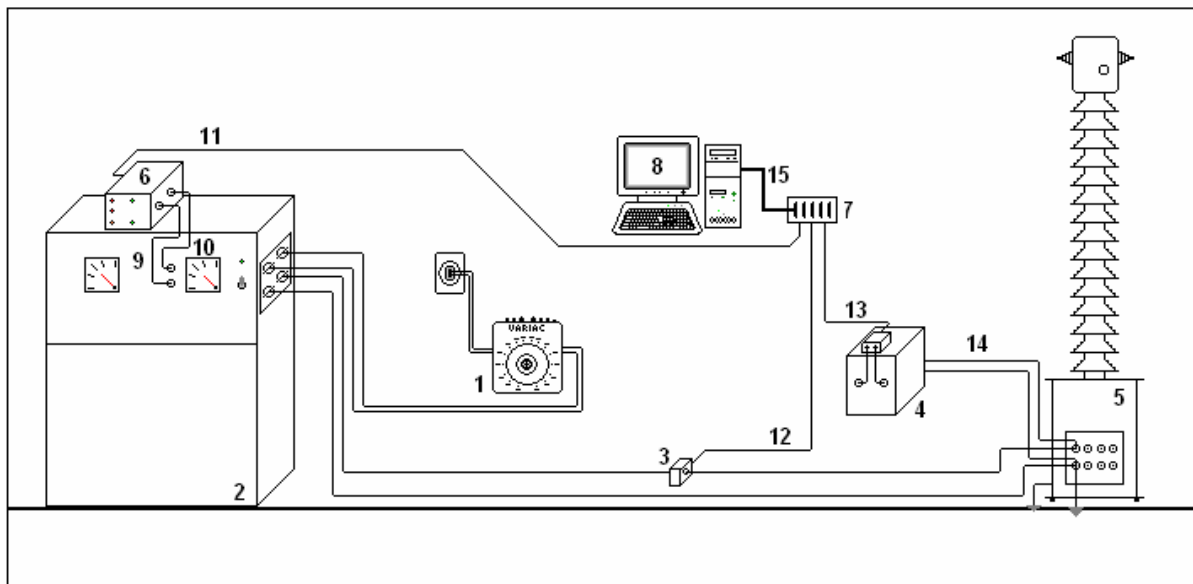
O sistema desenvolvido utiliza dois circuitos distintos, um para enrolamentos de medição e outro para enrolamentos de proteção, empregando as fontes de tensão disponíveis no laboratório.

### **5.4.1 Diagrama da montagem física**

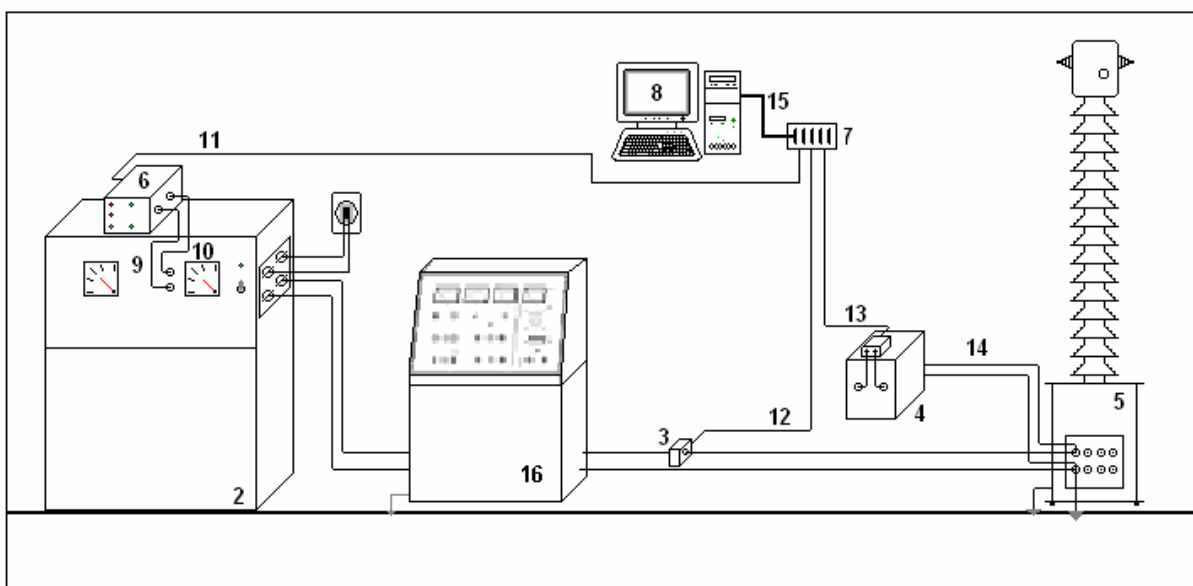
A figura 18 apresenta a montagem do circuito real para ensaio de saturação para enrolamentos de medição. Os componentes utilizados nesse circuito e suas respectivas funções estão descritos na tabela 4.

Esses itens, bem como o procedimento de realização do ensaio, também são válidos para o circuito do ensaio para enrolamentos de proteção, apresentado na

figura 19, o qual possui uma fonte adicional que permite elevar a tensão de saída da fonte sob controle aos níveis exigidos para esse enrolamento.



**Figura 18: Montagem do circuito de ensaio de saturação automatizado para enrolamentos de medição de TC**



**Figura 19: Montagem do circuito de ensaio de saturação automatizado para enrolamentos de proteção de TC**

**Tabela 4: Descrição dos itens do circuito de ensaio de saturação automatizado**

Ref.	Componente	Descrição
1	Variac	Responsável pela redução da tensão de alimentação da fonte com o objetivo de aumentar a resolução da mesma.
2	Fonte de tensão AC variável	Autotransformador com tensão de alimentação de 220 V; 60 Hz. Fornece em sua saída uma tensão AC variável de (0 a 480) V, 60 Hz e 375 A.
3	Transdutor de corrente TC201	Transformador de corrente com relação de transformação de 100 mV/A. Opera com um capacitor de 0,15 $\mu$ F em paralelo com a saída para eliminar ruídos.
4	Transdutor de tensão	Conjunto de 2 transformadores redutores de tensão. TP1 – 2200 V para 220 V e TP2 – 220 V para 6 V.
5	Transformador de corrente	Equipamento a ser verificado no ensaio
6	Circuito de controle da fonte	Controlado pela placa DAQ, via software, é responsável pelo acionamento dos comandos subir e descer da fonte, isolamento para proteção da placa DAQ e indicação de estado e posicionamento da fonte.
7	Pente de bornes da placa DAQ	Realiza a conexão entre os elementos de circuito e a placa de aquisição que está inserida no computador.
8	Computador pessoal – PC	Comporta a placa DAQ e suas configurações, e contém a interface de operação do sistema.
9	Cabo de acionamento	Envia os comandos para as chaves contadoras na fonte que acionam o motor responsável pela variação da tensão.
10	Cabo de leitura	Recebe o estado das chaves de fim de curso e disjuntor para indicação real e virtual.
11	Cabo de controle: 10 m.	Realiza a conexão entre o circuito de acionamento e isolamento com o pente de bornes da placa de aquisição.
12	Cabo de medição da corrente: 10 m.	Leva o sinal da corrente medida no circuito de ensaio em tensão para o pente de bornes da placa DAQ.
13	Cabo de medição da tensão: 20 m.	Leva o sinal reduzido da tensão de ensaio do TP2 para o pente de bornes da placa DAQ.
14	Cabo de conexão do TP1	Realiza a conexão do enrolamento secundário do TC sob ensaio.
15	Cabo da placa DAQ	Realiza a conexão entre o pente de bornes e a placa DAQ.
16	Autotransformador elevador de tensão	Utilizado somente para ensaios na proteção. Aumenta a tensão de ensaio para aproximadamente 1650 V.

### 5.4.2 Procedimento operacional

O procedimento de ensaio descrito a seguir é um resumo do manual de operação do sistema que foi redigido para o laboratório no qual o sistema foi implementado.

Passo 1 - Ligar o computador e esperar 30 min para estabilização da placa DAQ;

Passo 2 - Preparar o circuito de ensaio de acordo com a figura 18 ou Figura 19;

Passo 3 - Conectar o cabo 15 (tabela 4) na placa DAQ;

(Obs.1: A conexão do cabo 15 (tabela 4) só deve ser realizada com o PC ligado.)

Passo 4 - Conferir todas as conexões;

Passo 5 - Abrir o programa no ícone AUTOSAT;

Passo 6 - Ligar a fonte de tensão;

Passo 7 - Verificar se os leds na janela CONTROLE FONTE e na caixa de controle (Figura 15 e Figura 20), bem como as indicações de tensão e corrente condizem com a realidade.

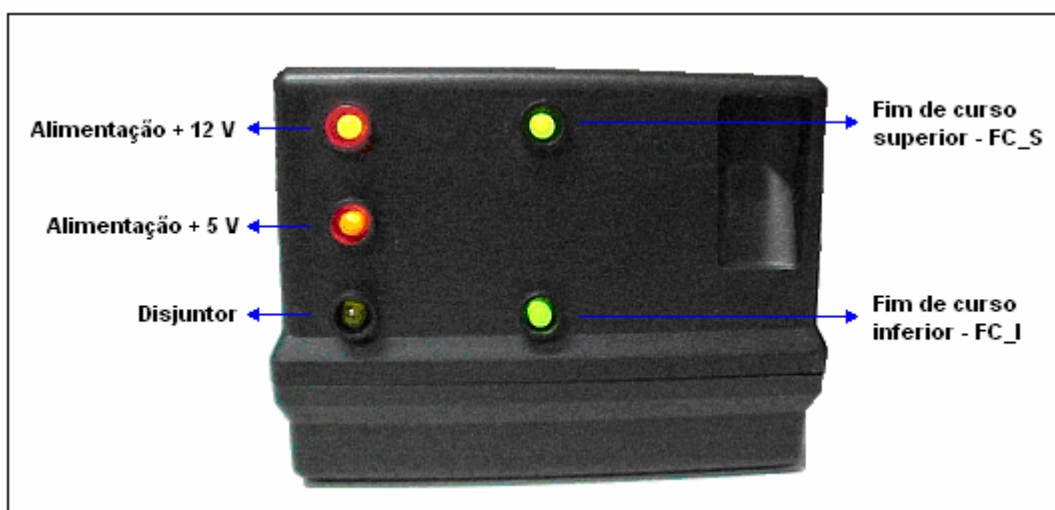


Figura 20: Caixa do circuito de controle da fonte de tensão

Passo 8 - Passar para a janela REALIZAR ENSAIO;

Passo 9 - Preencher os campos de identificação do TC e limites de controle;

#### Passo 10 - Acionar o INICIAR.

A fonte começará a elevar o valor da tensão, as medições serão realizadas e apresentadas ponto a ponto nos indicadores:  $I_{rms}$  (A),  $V_{rms}$  (V) e  $V_{pico}$  (V). O gráfico da curva de magnetização também será formado ponto a ponto na tela.

Quando os limites de tensão ou corrente forem atingidos o ensaio entra no seguinte processo de finalização:

- a fonte para;
- os dados registrados são enviados para o Excel;
- a fonte começa a retornar para o seu ponto inicial;
- atingido o fim de curso inferior, o ensaio está terminado.

Passo 11 - Salvar a planilha de resultados com outro nome deixando a planilha padrão livre para outros ensaios.

(**Obs.2:** Antes de realizar um novo ensaio limpar registros anteriores com o botão zerar dados.)

A transição do procedimento tradicional de realização do ensaio para o procedimento automatizado definiu um novo método de realização que engloba as seguintes características:

- controle automático da fonte de tensão, em um processo de variação sem interrupções dentro da faixa de operação;
- obtenção da medição simultânea da corrente e da tensão, em um processo automático, sem interferência do operador e com um número maior de dados;
- visualização dos dados e da curva de saturação em tempo real;
- registro e tratamento de dados sem influência do operador;
- apresentação automática do resultado da medição com a incerteza associada.

## **6 AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO SISTEMA DESENVOLVIDO**

O sistema de automação desenvolvido para o ensaio de saturação em TC é analisado neste capítulo.

A avaliação metrológica a priori analisa os elementos que compõem as cadeias de medição, identifica as fontes de incerteza e a sua influência no processo.

Com base nos erros admitidos para o processo é proposto um método de avaliação dos resultados do ensaio. Esse método teve como base critérios estabelecidos em norma técnica para avaliação de resultados do ensaio de saturação.

### **6.1 Caracterização do processo de medição**

Para que um processo de medição seja adequado é necessário avaliar a incerteza da medição e comprovar que essa seja menor do que a incerteza admissível para o processo [47].

Para isso é necessário que o processo de medição esteja bem caracterizado e que a avaliação da incerteza do processo seja realizada como um todo. Isso envolve uma perfeita caracterização do mensurando e das condições de contorno do processo de medição [79].

As condições de contorno se referem às precauções que devem ser executadas e controladas, antes, durante e depois da realização do ensaio. A preparação do circuito de ensaio, os cuidados com as interligações e condições ambientais são elementos que devem ser controlados para garantir a repetitividade e reprodutibilidade dos resultados.

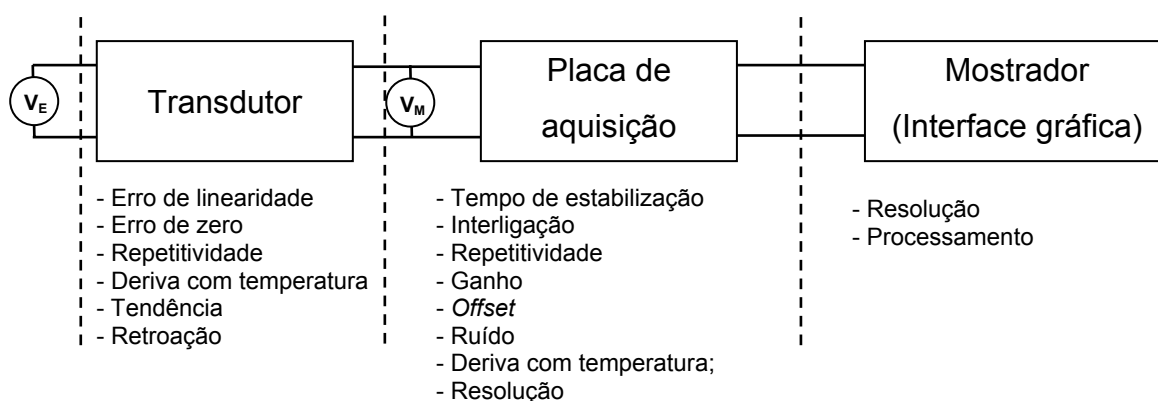


Os equipamentos envolvidos no processo devem ser operados conforme suas prescrições, mantendo-se as grandezas de influência em valores aceitáveis. Essas condições referenciam o processo de forma a garantir que sua exatidão se mantenha dentro da faixa especificada.

O processo de medição do sistema de automação do ensaio de saturação possui duas cadeias de medição; uma para medição da tensão e outra para medição da corrente.

O diagrama em blocos da figura 21 apresenta uma cadeia de medição geral que serve para os dois sistemas de medição. A cadeia foi dividida em três blocos: transdutor, placa de aquisição e mostrador (esses blocos executam as funções de transdução, aquisição e processamento e apresentação respectivamente.)

A cada bloco funcional estão associadas as principais fontes de incerteza. Uma análise mais detalhada, no próximo item, permite identificar as fontes de incerteza que são realmente significativas no processo em questão.

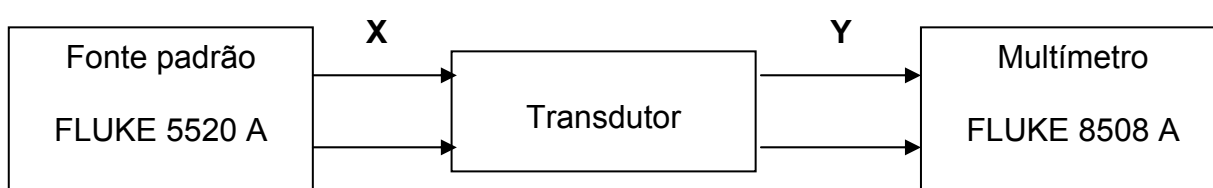


**Figura 21: Diagrama em blocos geral para as duas cadeias de medição e mapeamento das possíveis incertezas associadas**

## 6.2 Avaliação a priori da incerteza da medição

### 6.2.1 Calibração dos transdutores

A calibração dos dois transdutores foi realizada com os mesmos equipamentos, procedimentos, método e circuito elétrico. O diagrama em blocos da figura 22 mostra um circuito geral descritivo, que serve para as duas calibrações tratadas aqui.



**Figura 22: Diagrama em blocos do circuito da calibração dos transdutores**

Na execução da calibração utiliza-se o modelo de leitura direta, na qual o sinal de saída do transdutor, alimentado pela fonte padrão FLUKE 5520 A, é medido pelo multímetro digital FLUKE 8508 A.

O valor da grandeza de entrada (X) é pré-determinado. Corresponde ao conjunto de pontos nominais escolhidos ao longo da faixa de medição do transdutor. Cada ponto deve ser medido no mínimo 3 vezes, de forma a verificar a repetitividade do instrumento [80]. O número de repetições (n) realizado para a medição determina a quantidade de ciclos de medição que ocorrerão durante a calibração.

A estimativa da grandeza de saída, em cada ponto de calibração, é obtida a partir da média das n observações repetidas (equação 34) com mudanças de evento a cada repetição [81]. O desvio padrão experimental dessas medições estima o erro aleatório da distribuição [82] [83] [84] [85].

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (34)$$

Onde:

Y - estimativa da grandeza de saída do transdutor;

Y<sub>i</sub> - valores das medições realizadas por ponto de calibração;

n - número de repetições.

A relação de transformação, que corresponde à sensibilidade do transdutor é obtida a partir do gráfico que relaciona Y em função de X. Com os pontos plotados, traça-se uma reta de ajuste. O método adotado nesse procedimento é o dos mínimos quadrados.

Essa reta representa uma aproximação linear da característica de resposta do transdutor. Em relação a ela são determinados: o erro de linearidade (que no caso particular é igual à tendência) e o erro de zero.

O método dos mínimos quadrados é indicado pelo ISO-GUM para obter a curva de calibração linear de um instrumento de medição [82]. Para tal análise foi empregado o programa Excel.

A característica de resposta do transdutor é assumida então como uma função linear definida pela equação 35.

$$y = Sx + b \quad (35)$$

Onde b é o deslocamento da reta no eixo Y, denominado de erro de zero, e S é a sensibilidade, ou relação de transformação, como usualmente tratada no contexto de transformadores para instrumentos.

O erro de linearidade (equação 36) corresponde à diferença entre a função que interpola os valores reais obtidos da calibração e os obtidos da função linear da reta de ajuste.

$$Erro_{Linear} = td = Y - Sx \quad (36)$$

A repetitividade associada ao erro aleatório pode ser estimada pela equação 37.

$$Re = \pm t \cdot s \quad (37)$$

Onde  $t$  é o coeficiente t-Student e  $s$  o desvio padrão dos valores de saída do transdutor para  $n$  repetições referentes ao valor de entrada considerado [86].

### 6.2.2 Avaliação da incerteza da calibração

O erro imputável ao processo de calibração deve ser tão pequeno quanto possível. Na maioria das áreas de medição não deveria ser maior do que um terço e, de preferência, um décimo do erro permissível do equipamento comprovado quando em uso [42].

Normalmente deve-se praticar devidas adequações considerando-se as diferenças entre as condições de referência durante a calibração e as condições de operação [82] [80].

Apesar das condições de operação serem diferentes das condições ambientais de referência sob as quais foram realizadas as calibrações, sabe-se que os transdutores utilizados não sofrem variações significativas.

As propriedades elétricas e magnéticas responsáveis pelo comportamento metrológico dos transformadores são pouco sensíveis às variações de temperatura, umidade e pressão [87].

Em [87] mostra-se que as únicas influências em transformadores estritamente magnéticos são dadas por sua própria constituição física, igualmente, pouco afetado pela temperatura e insensível à umidade e à pressão [87].

Uma vez demonstrado pela calibração que o equipamento de medição tem desempenho correto (dentro das especificações), admite-se normalmente que os

erros surgidos durante o uso não excedem os limites especificados de erro permissível [80] [62] [57].

Parte-se do pressuposto que o equipamento continue assim até a próxima calibração e comprovação, desde que o equipamento não esteja em condições de uso freqüentemente mais severas, quando comparadas com as condições controladas da calibração [62] [57].

A utilização de métodos estatísticos é recomendada para monitorar e controlar a incerteza da medição de forma contínua [88]. Por uma questão de segurança precisa-se de um fator de segurança do erro máximo dos transdutores avaliados na calibração para ser ajustado na medida em que se forma um histórico do processo.

Inicialmente propõe-se que tal fator tenha valor igual a 1,2. Essa margem de segurança de 20%, no caso em questão, não compromete a relação entre a incerteza desejável e a praticada.

As incertezas envolvidas no processo de calibração estão apresentadas na tabela 5.

**Tabela 5: Definição das incertezas padrões do processo de calibração com base no fabricante**

Fonte de incerteza	Tipo	$\nu$	Distribuição	Divisor	$u_{\text{padrão}}$
$E_{\text{máx}}P$	B	$\infty$	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{(x1)} = E_{\text{máx}}P/\sqrt{3}$
$R_P$	B	$\infty$	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{(x2)} = R_P/\sqrt{3}$
$E_{\text{máx}}M$	B	$\infty$	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{(Y1)} = E_{\text{máx}}M/\sqrt{3}$
$R_M$	B	$\infty$	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{(Y2)} = R_M/\sqrt{3}$

Sendo:

$E_{\text{máx}}P$  = erro máximo da fonte padrão

$R_P$  = resolução da fonte padrão

$E_{\text{máx}}M$  = erro máximo do multímetro

$R_M$  = resolução do multímetro

$\nu$  = graus de liberdade.

$u_{(x1)}$  = incerteza padrão do erro máximo da fonte padrão.

$u_{(x2)}$  = incerteza padrão da resolução da fonte padrão.

$u_{(Y1)}$  = incerteza padrão do erro máximo do multímetro.

$u_{(Y2)}$  = incerteza padrão da resolução do multímetro.

A incerteza padrão combinada  $u_c$  para o processo de calibração com base em especificações do fabricante é encontrada com a utilização da equação (38) [83].

$$u_c^2(cal) = u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(y_1) + u^2(y_2) \quad (38)$$

A incerteza expandida  $U_{95\%}$  representada por  $I_{cal}$  é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência  $k$  com 95 % de confiança, utiliza os critérios e equações adotadas pelo ISO-GUM. Nesta calibração o resultado é apresentado como na equação (39) com  $k = 2$  [83].

$$U_{95\%} = I_{cal} = k \times u_c(cal) \quad (39)$$

As incertezas relativas às influências de condições ambientais não são consideradas porque as medições foram realizadas em condições que se encontram dentro da faixa de operação especificada pelo fabricante dos instrumentos.

A calibração foi executada utilizando-se dos recursos disponíveis num laboratório credenciado, pertencente à Rede Brasileira de Calibração, num ambiente com temperatura de  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $(55 \pm 10) \%$ .

### 6.2.2.1 Resultados da calibração do transdutor de tensão

A tabela 6 apresenta os valores das incertezas obtidas na calibração que se procedeu a partir de 15 medições para cada ponto nominal na faixa de calibração de (0 a 480) V.

A análise gráfica descrita no item anterior, segundo o método dos mínimos quadrados, teve como resultado a função da característica de resposta do transdutor representada pela equação (40).

$$y = 0,00310x - 0,0003 \quad (40)$$

O valor do erro de zero representado pelo coeficiente linear da equação (40) pode ser considerado desprezível diante dos valores analisados.

**Tabela 6: Incertezas obtidas na calibração do transdutor de tensão**

X (V)	Y (V)	s (V)	s* (V)	Re (V)	Td (V)	Ical (V)	Emáx (V)
30	0,093	0,0000027	0,00086	0,0019	-0,00015	0,011	0,012
60	0,187	0,0000067	0,00215	0,0046	-0,00020	0,018	0,023
90	0,280	0,0000083	0,00266	0,0057	-0,00022	0,028	0,033
120	0,374	0,0000088	0,00283	0,0061	-0,00022	0,035	0,040
150	0,468	0,0000086	0,00278	0,0060	-0,00022	0,042	0,047
180	0,561	0,0000120	0,00387	0,0083	-0,00021	0,049	0,057
210	0,655	0,0000131	0,00423	0,0091	-0,00019	0,056	0,065
240	0,748	0,0000119	0,00384	0,0082	-0,00016	0,063	0,071
270	0,842	0,0000127	0,00410	0,0088	-0,00012	0,070	0,079
300	0,935	0,0000205	0,00661	0,0142	-0,00007	0,078	0,092
330	1,029	0,0000177	0,00571	0,0123	-0,00006	0,132	0,144
360	1,123	0,0000172	0,00556	0,0119	-0,00001	0,143	0,155
390	1,216	0,0000152	0,00492	0,0106	0,00006	0,154	0,164
420	1,310	0,0000149	0,00482	0,0103	0,00012	0,165	0,175
450	1,403	0,0000165	0,00531	0,0114	0,00018	0,176	0,187
480	1,497	0,0000190	0,00612	0,0131	0,00027	0,186	0,200

Obs.: s\* = desvio experimental refletido na entrada.

As incertezas do processo de calibração (Ical) são obtidas a partir da tabela 5, com base nas equações de erro máximo fornecidas pelos fabricantes dos instrumentos utilizados no processo (tabela 7). O erro máximo avaliado é o resultado

da soma da incerteza do processo de calibração (Ical), da repetitividade (Re) e da tendência (Td).

**Tabela 7: Características metrológicas dos instrumentos de calibração<sup>1</sup>**

Erro Máximo da fonte padrão FLUKE 5520 A		Erro Máximo do multímetro FLUKE 8508 A	
Faixa de trabalho	Accuracy	Faixa de medição	Accuracy
(30 a 330) V	$(190 \text{ ppm } VA^2 + 0,010) \text{ V}$	(0 a 200) mV	$(110 \text{ ppm } VM^3 + 20 \text{ ppm range}) \text{ mV}$
(330 a 480) V	$(300 \text{ ppm } VA + 0,010) \text{ V}$	(0,2 a 2) V	$(85 \text{ ppm } VM + 10 \text{ ppm range}) \text{ V}$

Obs. 1 – Para relatar fielmente as especificações manteve-se as indicações *Accuracy*, ppm e *range*.

2 – VA significa valor aplicado.

3 – VM significa valor medido.

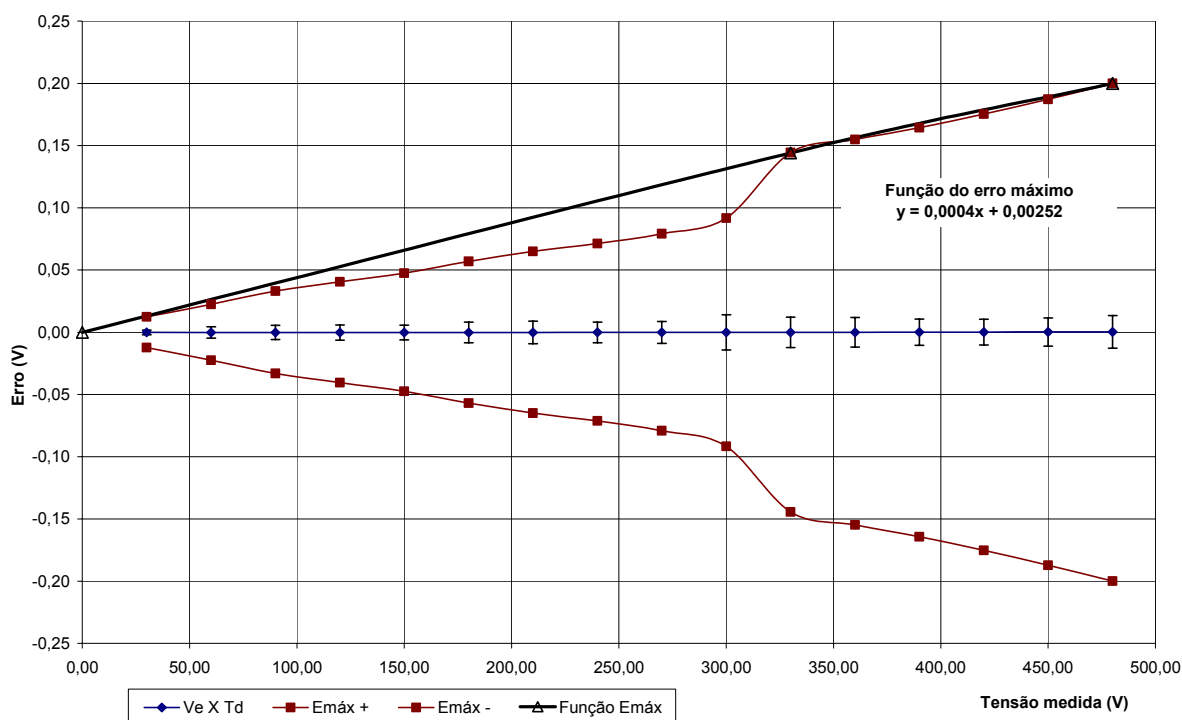
Pode-se observar, devido aos baixos valores do desvio experimental, que o conjunto de transformadores possui uma boa repetitividade. Observa-se também, que a maior contribuição na incerteza da calibração provem da incerteza do processo de calibração - Ical, mais especificamente do voltímetro.

A figura 23 apresenta a curva de calibração do transdutor de tensão. Nela pode-se observar os valores encontrados para repetitividade, tendência e erro máximo da calibração.

A reta função do erro máximo foi traçada utilizando os pontos de maior incerteza na faixa, e engloba todos os outros valores obtidos. Essa função é usada no processo de avaliação da incerteza da medição do sistema de automação.

O fator de segurança 1,2 é multiplicado pelo resultado da função do erro máximo avaliado para cada medição realizada no ensaio, durante o processamento da contribuição da incerteza do transdutor.





**Figura 23: Curva de calibração do transdutor de tensão - nível de confiança de 95%**

### 6.2.2.2 Resultados da calibração do transdutor de corrente

A tabela 8 apresenta os valores das incertezas obtidas na calibração que se procedeu a partir de 5 medições para cada ponto nominal na faixa de calibração de 10 mA a 10 A.

A relação de transformação obtida em análise gráfica descrita no item anterior, segundo o método dos mínimos quadrados, teve como resultado a função da característica de resposta do transdutor representada pela equação (41).

$$y = 0,10002x + 0,0040900 \quad (41)$$

O valor do erro de zero, representado pelo coeficiente linear da equação (41) pode ser considerado desprezível diante dos valores analisados.

Tabela 8: Incertezas obtidas na calibração do transdutor de corrente

X (mA)	Ym (mV)	s (mV)	s (mA)	Re (mA)	Td (mA)	Ical (mA)	Emáx (mA)
10	1,00	0,00080	0,0080	0,022	-0,0049	0,08	0,10
20	2,00	0,00045	0,0045	0,013	-0,0009	0,08	0,10
30	3,00	0,00071	0,0071	0,020	-0,0045	0,09	0,10
40	4,00	0,00076	0,0076	0,021	-0,0092	0,09	0,10
50	5,00	0,00116	0,0116	0,032	-0,0124	0,09	0,11
60	6,00	0,00045	0,0045	0,013	-0,0178	0,10	0,09
70	7,00	0,00046	0,0046	0,013	-0,0168	0,10	0,10
80	8,00	0,00057	0,0057	0,016	-0,0162	0,10	0,10
90	9,00	0,00076	0,0076	0,021	-0,0146	0,11	0,11
100	10,00	0,00141	0,0141	0,039	-0,0152	0,11	0,13
150	15,01	0,00087	0,0087	0,024	-0,0222	0,13	0,13
200	20,01	0,00182	0,0182	0,051	-0,0266	0,15	0,17
250	25,01	0,00170	0,0170	0,047	-0,0214	0,17	0,20
500	50,02	0,00402	0,0402	0,112	0,0100	0,35	0,47
750	75,02	0,00621	0,0621	0,172	0,0257	0,45	0,65
1000	100,04	0,01941	0,1940	0,539	0,1337	0,56	1,23
2500	250,07	0,02134	0,2133	0,592	0,0346	4,52	5,15
5000	500,13	0,09259	0,9257	2,570	0,0160	6,15	8,73
7500	750,18	0,12939	1,2937	3,591	-0,0285	7,83	11,40
10000	1000,24	0,18613	1,8609	5,166	-0,0090	9,54	14,70

As incertezas do processo de calibração (Ical) são obtidas a partir da tabela 5, com base nas equações de erro máximo fornecidas pelo fabricante (tabela 9) dos instrumentos utilizados no processo. O erro máximo avaliado é o resultado da soma da incerteza do processo de calibração (Ical), da repetitividade (Re) e da tendência (Td).

Tabela 9: Características metrológicas dos instrumentos de calibração

Erro máximo da fonte padrão FLUKE 5520 A	
Faixas de trabalho	Exatidão
(10 a 330) mA	$(0,04\% VA^1 + 0,02) \text{ mA}$
(330 a 1100) mA	$(0,05 \% VA + 0,1) \text{ mA}$
(1100 a 10000) mA	$(0,06\% VA + 2) \text{ mA}$
Erro máximo do multímetro FLUKE 8508 A	
Faixa de medição	Exatidão
(1 a 200) mV	$(110 \text{ ppm } VM^2 + 20 \text{ ppm range}) \text{ mV}$
(200 a 1000) mV	$(85 \text{ ppm } VM + 10 \text{ ppm range}) \text{ mV}$

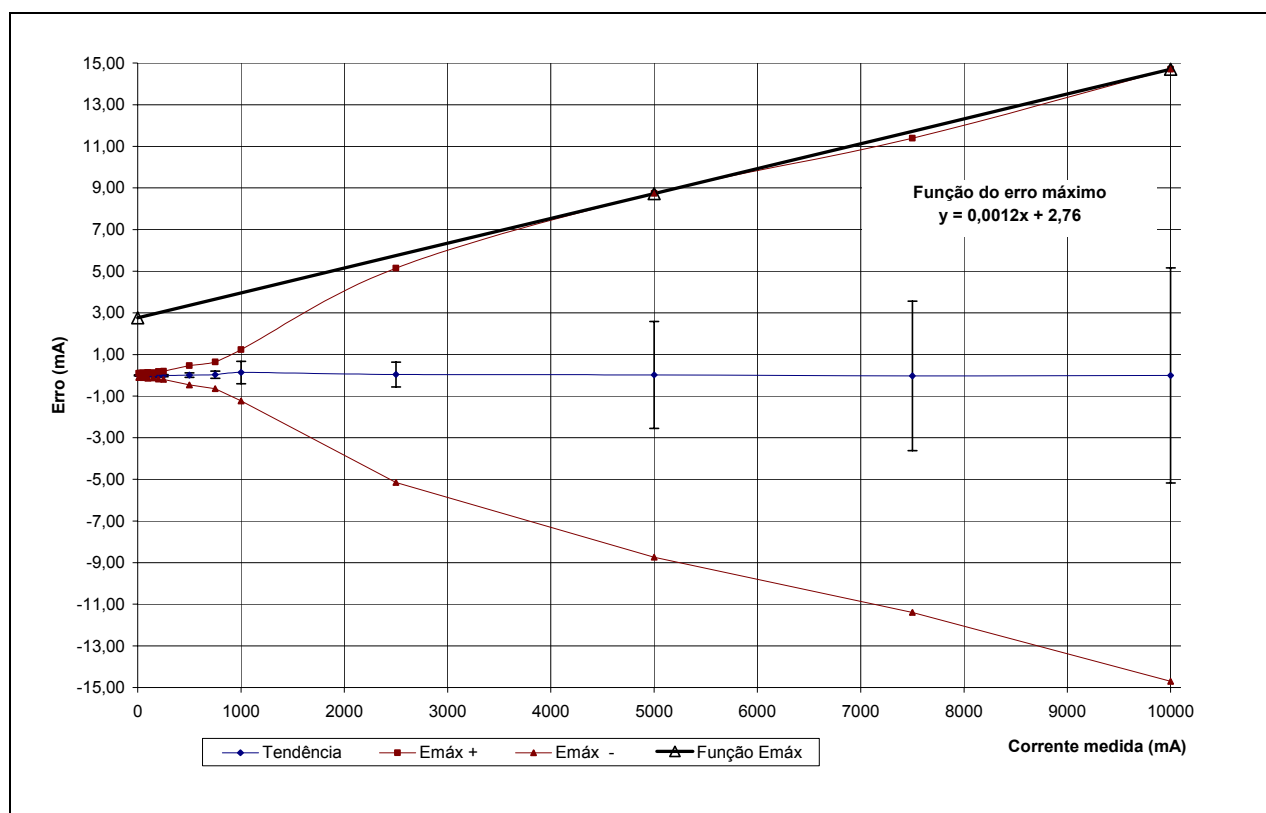
\* VA = valor aplicado e VM = valor medido.

Com base nesses dados foi elaborado o gráfico da curva de calibração do transdutor de corrente. Todavia, na definição da função do erro máximo foi necessário dividir a faixa de medição em duas faixas distintas. Essa divisão teve como fundamento a evolução do erro máximo avaliado dentro da faixa de calibração.

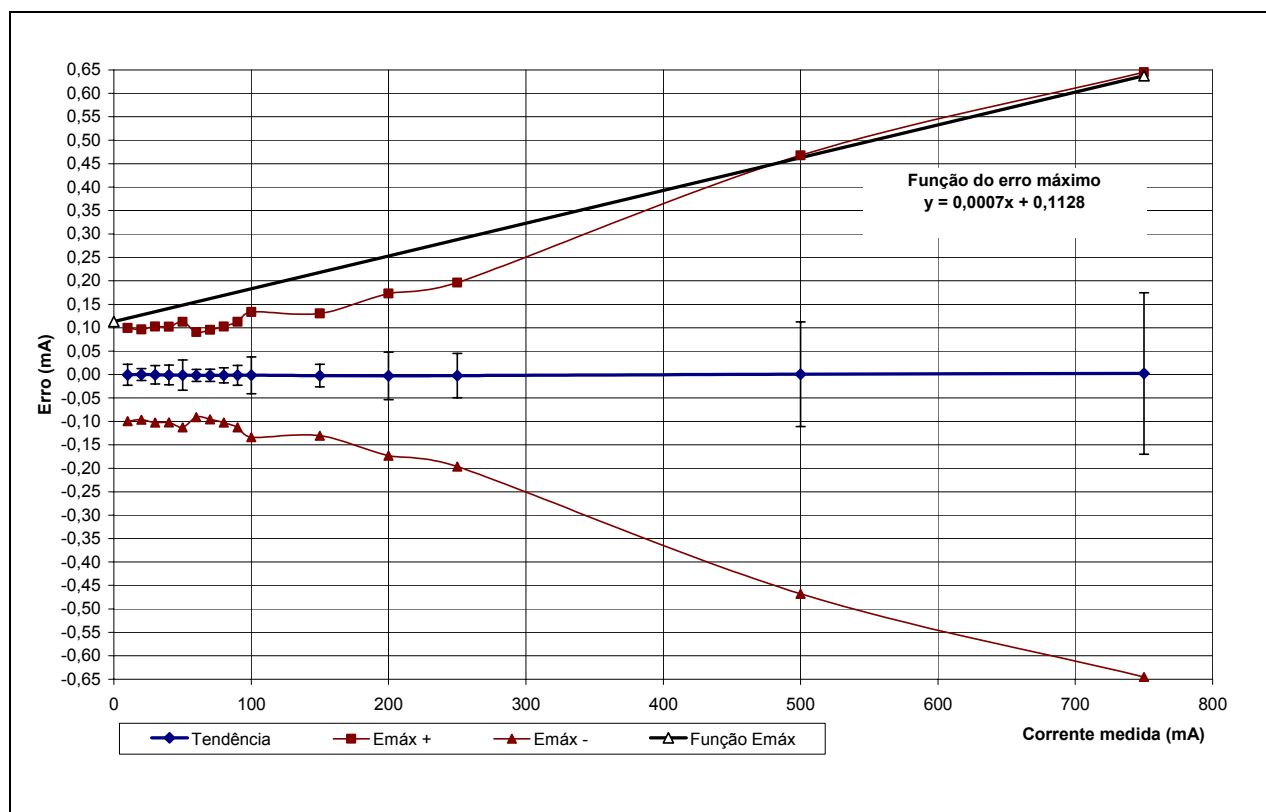
Na primeira faixa estabelecida entre 10 mA e 750 mA (figura 25) foi possível definir uma função, cujos valores de erro correspondentes foram considerados como admissíveis para o ensaio de saturação.

O mesmo ocorreu para a segunda faixa de 750 mA a 10000 mA (figura 24). A função aceitável para essa faixa, porém, se utilizada para valores inferiores a 750 mA começa a inferir erros que variam aproximadamente de 1 a 25 % do valor medido.

Como tal fato não condiz com a realidade, esse transdutor possui duas funções de erro máximo utilizadas no processamento da incerteza da medição no sistema automatizado. O fator de segurança 1,2 é multiplicado pelo resultado da função do erro máximo avaliado para cada medição.



**Figura 24: Curva de calibração do transdutor de corrente de (750 a 10000) mA - nível de confiança de 95%**



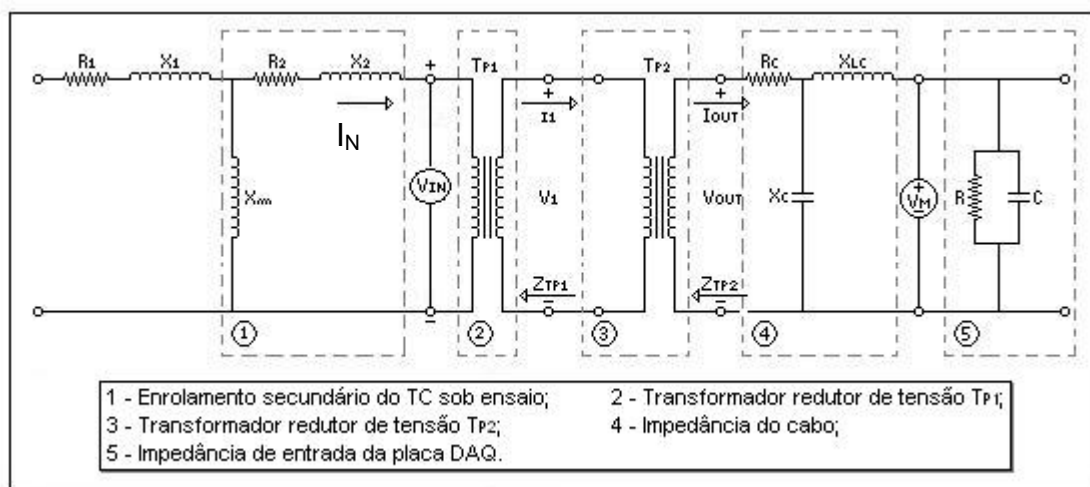
**Figura 25: Curva de calibração do transdutor de corrente de (10 a 750) mA - nível de confiança de 95%**

### 6.2.3 Modelo das cadeias de medição

Esse item apresenta o circuito elétrico modelo de cada cadeia de medição do processo. Com base nesses circuitos é realizada uma análise do caminho percorrido pelo sinal desde sua origem até o ponto de medição na entrada analógica da placa DAQ.

A figura 26 apresenta o circuito equivalente da cadeia de medição da tensão. O circuito engloba o processo de medição, desde o enrolamento secundário do TC sob ensaio até a placa de aquisição.

O objeto de medição é a tensão desenvolvida no secundário do TC, tensão  $V_{IN}$  na figura 26. Essa tensão é função da tensão aplicada pela fonte AC. Se a cadeia de medição fosse ideal, essa é a tensão que chegaria à placa DAQ.



**Figura 26: Circuito elétrico equivalente da cadeia de medição da tensão**

Uma impedância conectada ao circuito secundário de um transformador será vista pelo primário multiplicado pela relação que está entre o primário e o secundário [89].

Conhecidas as propriedades de propagação da tensão em um circuito de impedâncias, realiza-se uma operação matemática com as impedâncias relativas do circuito. Tem-se que:

$$Z_{TP_2} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (42)$$

$$Z_{TP_1} = \frac{V_1}{I_1} \quad (43)$$

$$I_{out} = \frac{I_1}{(N_2/N_1)} \quad (44)$$

$$V_{out} = \frac{V_1}{(N_1/N_2)} \quad (45)$$

$$Z_{TP_2} = \frac{V_1}{I_1} (N_2/N_1)^2 \quad (46)$$

$$Z_{TP_2} = Z_{TP_1} (N_2/N_1)_{TP_2}^2 \quad (47)$$

$$Z_{TP_1} = \frac{V_{IN}}{I_N} (N_2/N_1)_{TP_1}^2 \quad (48)$$

$$Z_{TP_2} = \frac{V_{IN}}{I_N} (N_2/N_1)_{TP_1}^2 (N_2/N_1)_{TP_2}^2 \quad (49)$$

Sendo:

$V_{IN}$  = tensão de excitação do secundário do TC sob ensaio.

$I_N$  = corrente de excitação do secundário do TC sob ensaio.

$Z_{TP_1}$  = impedância vista na saída do transformador 1.

$Z_{TP_2}$  = impedância vista na saída de do transformador 2..

$V_1$  = tensão de saída do transformador 1.

$I_1$  = Corrente de saída do transformador 1.

$V_{OUT}$  = tensão de saída do transformador 2.

$I_{OUT}$  = Corrente de saída do transformador 2.

$R_c$  = resistência do cabo.

$X_{LC}$  = reatância indutiva do cabo.

$X_C$  = reatância capacitiva do cabo.

$Z_C$  = modelo equivalente do cabo.

$V_M$  = Valor da tensão a ser medida (na entrada da placa DAQ).

$Z_{PL}$  = modelo equivalente da entrada da placa DAQ ( $R=100\text{ G}\Omega$  e  $C=100\text{ pF}$ ).

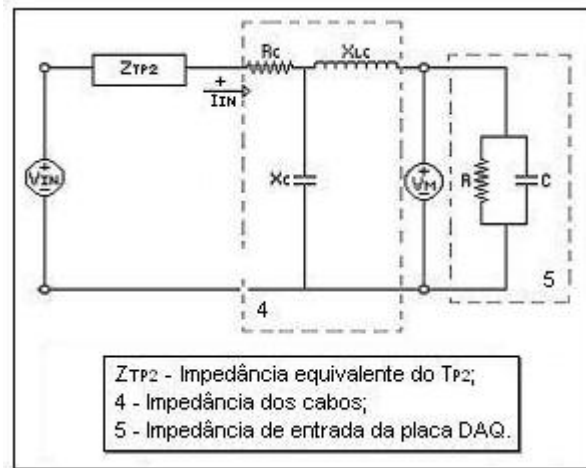
$N_1$  = número de espiras do primário do transformador.

$N_2$  = número de espiras do secundário do transformador.

A impedância equivalente à cadeia de medição de tensão referenciada ao secundário do TP<sub>2</sub> pode ser representada conforme a equação (49). As relações de transformação são iguais a 10 para o TP<sub>1</sub> e 31 para o TP<sub>2</sub>. Considerando-se com base na máxima relação tensão/corrente típica obtida da referência [11], a máxima impedância típica do TC sob ensaio antes da saturação é da ordem de 20  $\Omega$ .

O conhecimento da real influência do transdutor de tensão, nesse caso, é tratado com a calibração do conjunto, o que permite conhecer com determinada exatidão a relação de transformação e sua incerteza associada.

O circuito resultante a ser analisado está apresentado na figura 27. As retroações provocadas pelo cabo e pela impedância de entrada da placa DAQ podem ser analisadas a partir desse circuito.



**Figura 27: Circuito reduzido da cadeia de medição da tensão**

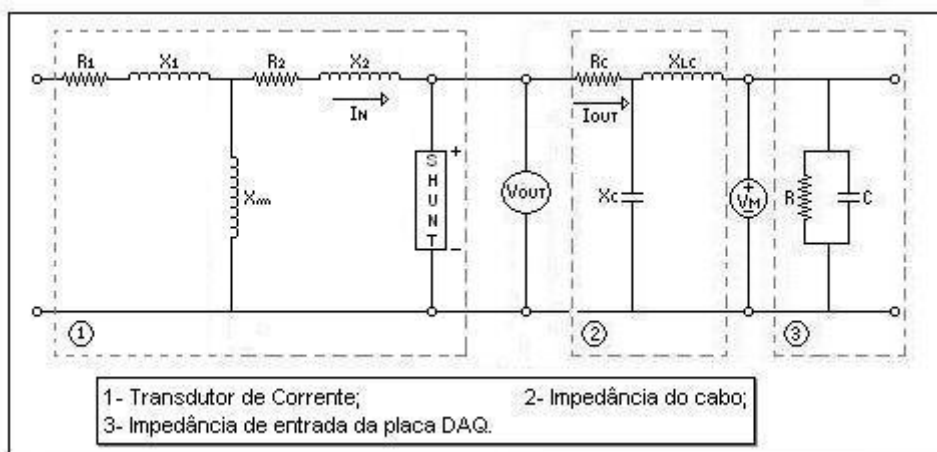
$$Z_{PL} = \frac{R/J_{WC}}{R + 1/J_{WC}} \Rightarrow Z_{PL} = \frac{R}{RJ_{WC} + 1} \quad (51)$$

A tensão aplicada ao secundário do TC medida durante o ensaio, é do tipo alternada na frequência industrial de 60 Hz. Ao aplicar os valores correspondentes da resistência, capacitância e frequência do sinal na equação (51) obtém-se uma impedância equivalente na entrada analógica da placa DAQ de aproximadamente  $2,7 \times 10^7 \Omega$ .

A impedância vista pela placa de aquisição, composta pela fonte de tensão, pelos transformadores de tensão e pelos cabos estará sempre muito abaixo de 1 k $\Omega$ . Dessa forma a relação de impedâncias pode ser desconsiderada.

A mesma analogia pode ser usada na avaliação do circuito equivalente da cadeia de medição da corrente. A figura 28 apresenta os elementos que compõem essa cadeia desde a grandeza de entrada ( $I_N$ ) no transdutor até a entrada da placa DAQ.





**Figura 28: Modelo equivalente da cadeia de medição da corrente**

A impedância do cabo entre a tensão de saída do transdutor ( $V_{out}$ ) e a tensão medida ( $V_M$ ) na entrada da placa DAQ, também na medição de corrente não oferece influências a ponto de causar uma atenuação considerável no sinal de interesse.

A cadeia de medição de tensão colocada em paralelo com o secundário do TC sob ensaio pode reduzir de forma significativa a tensão sobre esse. Mas como a tensão que está sendo medida é tensão alternada, tal fato não implica erro de medição.

Fato semelhante ocorre com relação à retroação provocada pela cadeia de medição da corrente. Seu efeito é o de reduzir a corrente no secundário do TC sob ensaio, porém essa corrente alterada é a que efetivamente está sendo medida.

#### 6.2.4 Placa DAQ

Segundo o fabricante da placa de aquisição [90] a equação para calcular a incerteza de uma medição na entrada analógica deve ser uma composição dos seguintes parcelas:

$$\text{Absolute accuracy} = \pm ((\text{input voltage} \times \% \text{ of reading}) + \text{offset} + \text{noise \& quantization} + \text{drift})$$

Onde, o *drift* é calculado para medições realizadas fora da faixa de temperatura de operação que varia de (15 a 35) °C, pela seguinte equação:

$$\text{Drift} = \text{Temperature difference} \times \% \text{ Drift per degree } ^\circ\text{C} \times \text{input voltage}.$$

Para os casos em que as medições são realizadas dentro da faixa de temperatura de operação da placa DAQ, a fórmula para o cálculo da incerteza pode ser reduzida para:

$$\text{Absolute accuracy} = \pm ((\text{input voltage} \times \% \text{ of reading}) + \text{offset} + \text{noise \& quantization})$$

Após efetuar o cálculo conforme o ganho utilizado e o valor medido, tem-se a incerteza tipo B da placa de aquisição, caracterizado como o erro máximo da placa. Essa fonte de incerteza, juntamente com a resolução são consideradas como uma distribuição retangular no balanço da incerteza da medição.

O manual da placa de aquisição fornece os dados para cada ganho conforme tabela 10:

**Tabela 10: Especificação de exatidão da placa DAQ 6024 E [91].**

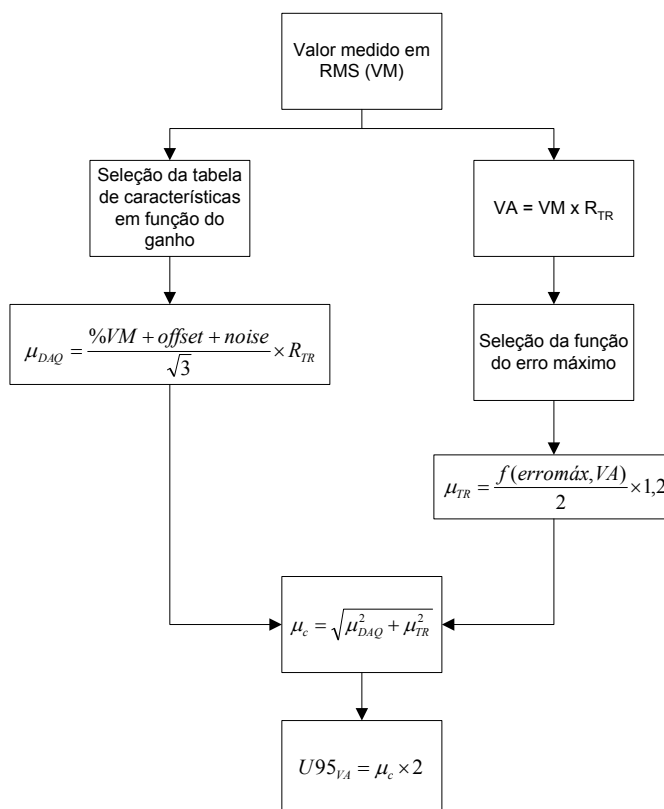
Gain	Nominal Range(V)		Absolute Accuracy					
			% of Reading	Offset	Noise + Quantization (mV)		Temp Drift	Absolute Accuracy at Full Scale
	Positive	Negative			Single			
	FS	FS	1 Year		Pt.	Averaged		
0,5	10	-10	0,0914	6,38	3,91	0,975	0,0010	16,504
1	5	-5	0,0314	3,20	1,95	0,488	0,0005	5,263
10	0,5	-0,5	0,0914	0,340	0,195	0,049	0,0010	0,846
100	0.05	-0.05	0.0914	0.054	0.063	0.006	0.0010	0.106

### 6.3 Balanço de incertezas

O balanço de incertezas é realizado no processamento do sistema de automação do ensaio durante as medições. O diagrama em blocos da figura 29 apresenta uma visão global dessa sub-rotina do programa.

Para cada ponto medido, o ganho utilizado na medição é armazenado. A faixa correspondente aos valores de incerteza para o respectivo ganho é selecionada. A incerteza da placa DAQ é calculada e depois de padronizada é armazenada em  $\mu_{DAQ}$ .

Simultaneamente, o valor medido é multiplicado pela relação de transformação  $R_{TR}$  referente ao transdutor em questão. As funções de erro máximo, apresentadas na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 são utilizadas e o fator de correção é aplicado a essa incerteza que depois de padronizada é somada a  $\mu_{DAQ}$ .



**Figura 29: Diagrama da sub-rotina de balanço de incertezas**

A título de ilustração, associou-se faixas de medição para os transdutores com base nas faixas da placa DAQ. A tabela 11 apresenta as faixas de medição da placa DAQ e seu valor correspondente em rms. A tabela 12 demonstra as incertezas padrões e expandidas obtidas para as cadeias de medição nessas faixas.

**Tabela 11: Faixas de medição na placa DAQ e VM correspondente**

Ganho	Faixa de medição da placa DAQ (V)	VM* em rms (V)
1	(- 5 a + 5)	(0,350 a 3,5)
10	(-0,500 a + 0,500)	(0,035 a 0,350)
100	(-0,050 a +0,050)	(0 a 0,035)

\* VM = valor medido.

Tabela 12: Incertezas padrão e expandida das cadeias de medição.

<b>Ganho</b>	<b>VA* no transdutor de tensão (V)</b>	<b>Incerteza padrão na placa DAQ (V)</b>	<b>Incerteza padrão no transdutor (V)</b>	<b>Incerteza da medição (95%) (V)</b>
1	(113 a 1129)	(0,13 a 0,89)	(0,033 a 0,24)	(0,27 a 1,8)
10	(11 a 113)	(0,017 a 0,13)	(0,012 a 0,033)	(0,042 a 0,27)
100	(0 a 11)	(0,000 a 0,017)	(0,010 a 0,012)	(0,020 a 0,042)
<b>Ganho</b>	<b>VA* no transdutor de corrente (mA)</b>	<b>Incerteza padrão na placa DAQ (mA)</b>	<b>Incerteza padrão no transdutor (mA)</b>	<b>Incerteza da medição (95%) (mA)</b>
1	(3.499 a 34.993)	(4,09 a 27,63)	(3,46 a 22,36)	(10,72 a 71,09)
10	(350 a 3.499)	(0,52 a 4,09)	(0,18 a 3,46)	(1,10 a 10,72)
100	(0 a 350)	(0,0 a 0,52)	(0,06 a 0,18)	(0,12 a 1,10)

\* VA = valor aplicado.

A garantia de que ao longo do tempo as incertezas das medições se mantêm dentro dos limites admissíveis envolve práticas de calibração, verificação da aptidão dos instrumentos para medir dentro dos limites admissíveis no processo e controle das condições de contorno [47].

A calibração das cadeias de medição do sistema automatizado desenvolvido para o ensaio de saturação pode ser realizada através dos módulos incorporados para esse fim no software de operação do sistema.

O registro de dados da calibração é fornecido em planilhas eletrônicas que fornecem a média das medições e seus desvios para o objeto sob calibração e o sistema de medição padrão.

Os devidos cálculos para obtenção da incerteza da medição devem ser realizados por um laboratório credenciado para essa função e assim com capacidade de garantir a rastreabilidade das grandezas.

Dentro dessas recomendações foi realizada uma calibração do sistema. Os resultados obtidos demonstraram uma incerteza inferior a calculada no processo. Porém ainda é cedo para assumir a incerteza de uma calibração do sistema.

Outras calibrações devem ser realizadas e os resultados comparados para verificação da reprodutibilidade do sistema de medição ao longo do tempo.

#### **6.4 Aplicação da incerteza da medição na avaliação crítica dos resultados do ensaio**

Nas referências sobre a execução do ensaio não foi encontrado qualquer laboratório ou documento que fizesse menção à incerteza da medição. Contudo, o resultado de uma medição não possui validade se a incerteza da mesma não estiver declarada.

O sistema de medição deve ter as características metrológicas requeridas para o uso pretendido (por exemplo: exatidão, estabilidade, faixa e resolução) [42].

Para a garantia da confiabilidade da avaliação da conformidade é necessário assegurar que o processo de medição possui incerteza adequada. Essa adequação está ligada aos valores máximos de incerteza admissível ( $Imáx_{adm}$ ) para o ensaio.

É importante definir os parâmetros e estabelecer critérios de conformidade baseado nas tolerâncias e, com base nas medições, criar um método de trabalho que garanta um resultado confiável à avaliação da conformidade [79].

As tolerâncias dos parâmetros de controle estabelecidas para a realização e avaliação dos resultados do ensaio de saturação se baseiam apenas em valores limites de aceitação.

Trata-se do caso de especificações do tipo valor máximo aceitável ou valor mínimo aceitável. Nesses casos a  $Imáx_{adm}$  deve ser estabelecida considerando-se

as implicações de se dispor de resultados que gerem dúvidas quanto à conformidade do equipamento.

Por exemplo, se valores usuais encontrados para um ensaio são muito inferiores ao limite estabelecido, pode-se conviver com uma incerteza de medição grande.

Se, no entanto, os valores usuais estão próximos do limite de aceitação, a incerteza de medição terá que ser pequena para que não se tenha grande dúvida acerca da conformidade do equipamento [79].

Assim, os limites máximos estabelecidos para efeito de interrupção no ensaio de saturação devem ser corrigidos para valores que considerem as incertezas das medições da corrente e da tensão.

Essa análise vale também para verificação da conformidade do equipamento com base nos resultados do ensaio. Normalmente os resultados de ensaios são comparados com os resultados do ensaio de fábrica do equipamento (ensaio de recepção). A análise é qualitativa. Na curva de saturação obtida do ensaio, selecionam-se pontos críticos em torno da região intermediária da curva (em torno do joelho) e verifica-se a corrente relativa a esse ponto. A distância entre a corrente medida no ensaio e a fornecida pelo fabricante não deve ser muito grande. Porém, não existe nenhuma referência normatizada sobre essa tolerância.

Contudo, uma referência foi encontrada em uma publicação do IEEE [11]. Ela estabelece que para as curvas de saturação de TC classe C ou K, a tensão aplicada não deve gerar um valor de corrente maior que 1,25 vez o valor de referência estipulado nas curva de saturação fornecidas por esse documento [11].

Para essa prescrição, se não houvesse incerteza, o limite de conformidade para a corrente ( $I_c$ ) seria igual a 1,25 vez a corrente de referência ( $I_{ref}$ ). Mas, a incerteza da medição existe e deve ser considerada.

Nesse caso, para garantir que o valor analisado esteja abaixo do  $I_c$ , a equação para verificação da conformidade do resultado precisa ser ajustado, considerando-se algumas precauções.

O método proposto por esta dissertação é o seguinte. Para o ponto sob análise, por uma questão de segurança, utiliza-se o valor de tensão menos a sua incerteza ( $V - I_{MV}$ ) (figura 30). Esse valor de tensão possui uma corrente de referência ( $I_{ref}$ ) na curva padrão (figura 31). Então, o valor da corrente medida em ensaio para o ponto sob análise, deveria ser no máximo 1,25 vezes o valor referente a  $I_{ref}$  da curva padrão. Porém, a incerteza da medição da corrente ( $I_{MI}$ ) ainda precisa ser considerada. E assim, a condição de conformidade fica sendo a estabelecida pela equação (52):

$$I_{m_i} \leq I_{ref_i} \times 1,25 - I_{MI_i} \quad (52)$$

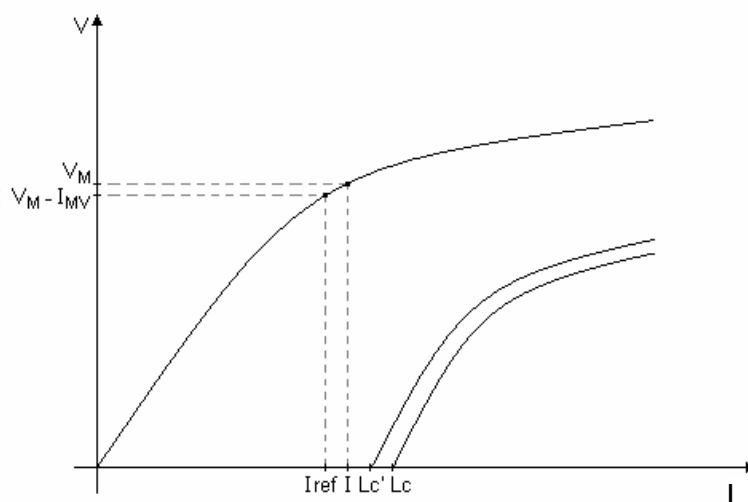
onde

$I_{m_i}$ : corrente medida para cada  $i$ -ésima tensão aplicada.

$I_{ref_i}$ : corrente de referência, função do valor e da incerteza de medição de cada  $i$ -ésima tensão aplicada.

$I_{MI_i}$ : incerteza de medição da corrente para cada  $i$ -ésima corrente medida.





Legenda:

$V_M$  = tensão medida;  $I$  = corrente no gráfico IEEE.  
 $V_M - I_{MV}$  = tensão medida menos a sua incerteza.  
 $I_{ref}$  = corrente de referência.  
 $I_{Lc}$  = limite de conformidade normatizado  
 $I_{Lc'}$  = limite de conformidade corrigido.

Figura 30: Ilustração da proposta para o estabelecimento do  $I_{Lc}$ .

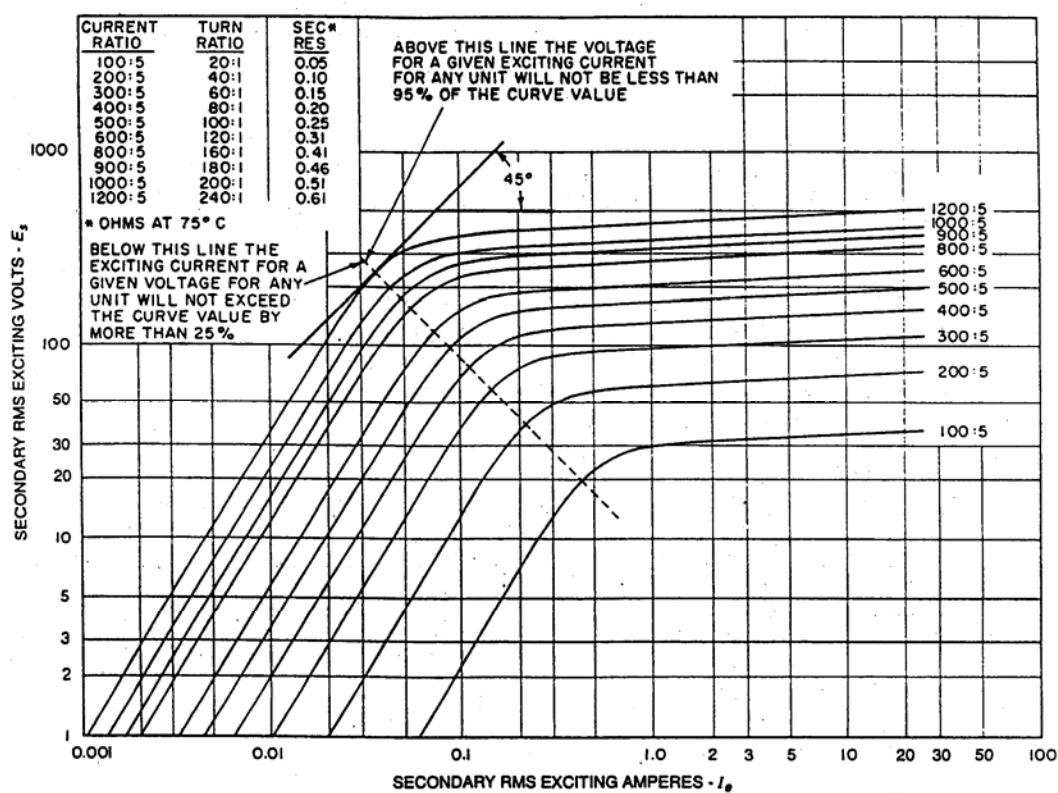


Figura 31: Curva de saturação típica para TC classes C ou K com núcleo fechado [11].

## 7 CONCLUSÕES

Reunir informações sobre transformadores de corrente, em especial sobre ensaios de saturação e seus aspectos metrológicos e operacionais não foi uma tarefa fácil. A bibliografia existente é muito antiga. As normas técnicas são poucas. Os artigos sobre o assunto tratam de situações muito específicas, e na maioria das vezes são omissos com relação aos aspectos metrológicos.

Contudo, toda a pesquisa realizada durante essa dissertação permitiu reunir um acervo de referências para o auxílio de profissionais e estudiosos da área. A contribuição desse trabalho também se dá pela reunião de informações na própria narrativa.

Muitos conceitos são encontrados de forma dispersa e às vezes até divergente. Uma dedicação especial foi dada à coleta e organização dos dados de forma a descrever sobre o tema com amplitude e ordenação coerentes.

A ABNT deixa bastante a desejar nas especificações dos ensaios de uma forma geral. Trata-se muitas vezes de menções superficiais que geram dúvida na compressão da informação. Os textos requerem suporte, não se fazem entender por si só. Além disso, estão totalmente em desacordo com a terminologia e com os atuais procedimentos relativos à confiabilidade metrológica.

Com relação ao ensaio de saturação, apesar de ser um ensaio realizado amplamente, não possui uma referência normatizada sobre seu procedimento de execução e avaliação dos resultados.

As prescrições para o ensaio são encontradas quase que exclusivamente no âmbito dos laboratórios e profissionais envolvidos no setor de transmissão de distribuição de energia elétrica.

Este trabalho permitiu despertar maior preocupação com a cultura metrológica no laboratório em que foi desenvolvido.

Nesse sentido, pode-se implantar uma idéia do uso de uma nova terminologia, pois, o setor utiliza termos próprios da área, que não são conformes com termos empregados na metrologia.

Foi difundida uma conscientização da importância da incerteza na medição e nos resultados avaliados. Para isso, foram propostos métodos para considerar a incerteza da medição na avaliação da conformidade.

Provavelmente, o desenvolvimento dessa dissertação proporcionou uma das primeiras realizações de ensaios em transformadores de corrente, em que a incerteza da medição seja avaliada e considerada nos resultados.

O emprego dos recursos de sistemas automatizados para aumentar a confiabilidade metrológica foi claramente evidenciado. O processamento dos dados em tempo real permitiu utilizar os valores de incerteza da medição apropriados para cada ponto.

A facilidade proporcionada por sistemas automatizados, no que se refere ao processamento, armazenamento e apresentação dos dados, contribuem na disseminação do uso da incerteza da medição na análise de resultados e verificação da conformidade em ensaios.

O desenvolvimento de um sistema de automação, com a utilização de placa de aquisição, se caracterizou como um recurso de baixo custo, se comparado com outros sistemas existentes.

Operacionalmente, identificou-se uma grande flexibilidade, segurança e simplicidade de implementação e uso. O sistema implantado disponibiliza ainda recursos para automatizar outros equipamentos do laboratório.

O programa Labview mostrou-se adequado para a aplicação. De fácil programação e operação, proporciona uma interface operacional com aspecto profissional, adicionado à possibilidade de se gerar um programa executável para ser utilizado em computadores que não possuem o programa instalado.

Operacionalmente o sistema se mostrou muito satisfatório. A visualização do desenvolvimento da curva de saturação durante o ensaio aproximou o operador da realidade. Isso possibilitou maiores recursos para se tomar decisões em tempo real e fazer análises antes de gerar o relatório final do ensaio.

A geração automática do relatório final economizou grande tempo dispensado anteriormente na transcrição dos dados manuscritos para o Excel. Adicionalmente houve a exclusão de possíveis erros causados pelo operador durante todo o processo de registro dos dados.

O tempo de execução do ensaio diminuiu consideravelmente. Obteve-se uma maior segurança na interrupção do ensaio em limites de controle. Com o controle automático a velocidade de atuação é muito maior do que quando controlado pelo operador.

O sistema pode ser facilmente implementado para futuras adaptações que envolvam os recursos disponíveis no sistema e as capacidades do software utilizado. Também pode ser transferido para um sistema operado por um computador PC portátil (tipo laptop). Essa facilidade de transição do sistema por completo é devido às próprias características da placa DAQ 6024-E. Ela também pode ser encontrada no padrão PCMCIA, com todas as especificações físicas e funcionais da placa PCI utilizada. Essa transição foi testada na prática e nenhum problema de integração foi encontrado.

A avaliação das cadeias de medição mostrou que o desempenho metrológico do sistema de medição atende às exigências necessárias para a garantia da confiabilidade dos resultados do ensaio.

O erro máximo avaliado na calibração tem grande parcela devida aos padrões empregados. No caso, não houve comprometimento dos resultados devido à boa capacidade do processo. O erro máximo estabelecido para o sistema é muito menor que a tolerância do processo.

Os objetivos do trabalho foram plenamente alcançados. A convivência com a rotina de trabalho de um laboratório de alta tensão do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica possibilitou conhecer não só o ensaio sob estudo, como outros vários aspectos do setor.

## **Recomendações para trabalhos futuros**

O sistema de automação do ensaio de saturação, na forma em que se encontra hoje em dia, pode ser utilizado para realizar os ensaios de tensão induzida e tensão suportável. O módulo de programação que permite o controle automático da fonte pode ser utilizado para realização desses ensaios. Propõe-se o estudo de tais ensaios sob enfoque metrológico e de automação.

Os recursos de automação implementados podem ser utilizados para a calibração integralmente automatizada das cadeias de medição. Isso pode ser feito com o controle de uma fonte padrão via interface GPIB já disponível no laboratório em que foi implementado o sistema de automação.

O próprio sistema desenvolvido pode ser expandido para realizar o gerenciamento dos intervalos de calibração e de possíveis compensações de incertezas. Independente da calibração automatizada é recomendado que futuras

calibrações sejam realizadas de forma a acompanhar os resultados do balanço de incertezas.

Outro trabalho importante para o setor de ensaios de equipamentos da transmissão é a revisão, sob enfoque metrológico, de todos os ensaios usuais. Procedimentos padronizados poderiam ser gerados para nortear o tratamento das questões metrológicas, nos diferentes ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABB POWER DISTRIBUTION. Instrument transformer. Technical information and application guide, [www.abb.com/distribution](http://www.abb.com/distribution). Último acesso em julho, 2004.
- [2] FONTI, P. Transformateurs de courant: comment les spécifier. Cahier technique Schneider Electric n° 194, janvier 2001.
- [3] OLHARC, M. Le transformateur de courant pour la protection en HT. Cahier technique Schneider Electric n° 164 édition, décembre 1992.
- [4] D'AJUZ, ARY. Equipamentos Elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro, FURNAS 1985.
- [5] SOLON M. F. Medição de Energia Elétrica, 3 ed. Rio de Janeiro, 1976.
- [6] OLIVEIRA, Patricia Calls. Análise de transformadores de corrente para medição, Dissertação de mestrado, Pós-MQI, Rio de Janeiro, fevereiro de 2001.
- [7] BITTANTI, S.; CUZZOLA, F.A.; LORITO, F.; PONCIA, G. Compensation of nonlinearities in a current transformer for the reconstruction of the primary current. IEEE Transactions on control systems technology, vol. 9, n° 4, p.565-573, july 2001.
- [8] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformadores para instrumentos – Terminologia. NBR 6456, ABR./1991.
- [9] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformador de Corrente – Especificação. NBR 6856, ABR./1992.
- [10] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformador de Corrente – Método de Ensaio. NBR 6821, ABR./1992.

- [11] IEEE Standard REQUIREMENTS FOR INSTRUMENT TRANSFORMERS - IEEE Std C57.13-1993 – March 4, 1994 (Revision of IEEE Std C57.13-1978).
- [12] INTERNATIONAL STANDARD - Instruments Transformers – Part 1: *Current Transformers* – IEC 60044-1 - Edition 1.2. Fev,2003.
- [13] NORME INTERNATIONALE CEI – Instruments Transformers – Part 6 – *Requirements for protective current transformers for transient performance*. IEC - 60044-6 – 1992.
- [14] WRIGHT, Arthur. Current Transformers – Their transient and steady state performance - Chapman and Hall, 1968.
- [15] DAVID, C.Y.; CUMMINS J.C.; WANG, Z.; KOJOVIC, L.A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks. IEEE Transactions on power delivery, vol. 16, nº 2, p.189-194, april 2001.
- [16] JACOBS P., JADIN V. Mesures Électriques –Courant continu, courant alternative à basse fréquence. Dunod-Paris, 1968.
- [17] MEDEIROS, E.P.; PINTO, O.A.P.; PAULI, A.; FERNANDEZ, L.R. Estudo de verificação da susceptibilidade dos transformadores de corrente à saturação, mediante a corrente de curto-circuito. I SME - Seminário de manutenção da Eletrosul. Florianópolis, setembro 2003.
- [18] GUZMÁN, A.; ZOCHOLL, S.; BENMOUYAL, G.; ALTUVE, H.J. A current-based solution for transformer differential protection - part 1: problem statement. IEEE Transactions on power delivery, vol. 16, nº 4, p.485-491, october 2001.
- [19] HRABLIUK, J.D.P. Optical current sensors eliminate CT saturation. NxtPhase Corporation, V5M 1Z4, p.1478-1481, Vancouver (BC), 2002.



- [20] YONG-CHEOL K, SEUNG-HUN OK, SANG-HEE Kang. A CT Saturation Detection Algorithm. I IEEE Transactions on power delivery, vol.19, no. 1, January 2004.
- [21] MOHINDAR, S.S.; SIDHU, T.S.; GILL, H.S. A busbar protection technique and its performance during CT saturation and CT ratio-mismatch. IEEE Transactions on power delivery, vol. 15, nº 3, p.895-901, july 2000.
- [22] TAVARES, M.C., COURY, D.V., CAMPOS, P.E.G. e LIMA, M.C..Análise de desempenho da proteção diferencial dos transformadores de potência com o emprego do ATP-EMTP, XV Seminário nacional de producao e transmissao de energia elétrica, Foz do Iguaçu, outubro de 1999.
- [23] BICHELS, Arlei. Curvas de saturação de transformadores- COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Curitiba,
- [24] KASZTENNY, B.; ROSOŁOWSKI, E.; LUKOWICZ M.; IZYKOWSKI, J. Current related relaying algorithms immune to saturation of current transformers. The Technical University of Wroctaw, p.365-368, Poland.
- [25] ALSTOM T&D PROTECTION AND CONTROL LTD.; MUTHUMUNI, D.; MCLAREN, P.G.; CHANDRASENA W.; PARKER, A. Simulation model of an air gapped current transformer. IEEE, Stafford (UK), 2001.
- [26] BUNYAGUL, T.; GALE, P.; CROSSLEY, P. Design and evaluation of an overcurrent relay suitable for operation with measurement current transformers. Developments in power system protection, conference publication nº 479, IEE, p.201-204, 2001.
- [27] CESÁREO, F. An impedance-based CT saturation detection algorithm for bus-bar differential protection. IEEE Transactions on power delivery, vol. 16, nº 4, p.468-472, october 2001.

- [28] CUMMINS, J.C.; YOON, HONG-JUN; YU, D.C.; WANG, Z.; KOJOVIC, L.A.; STONE, D. Neural network for current transformer saturation correction. IEEE, p.441-446, 1999.
- [29] GALE, P.; BUNYAGUL, T.; CROSSLEY, P. Overcurrent protection using signals derived from saturated measurement CTs. IEEE, p.103-108, 2001.
- [30] HOSEMANN, G.; STEIGERWALD, H.M. Modal saturation detector for digital differential protection. IEEE Transactions on power delivery, vol. 8, nº 3, p.993-940, july 1993.
- [31] LOCCI, N.; MUSCAS, C. A digital compensation method for improving current transformer accuracy. IEEE transactions on power delivery, vol. 15, nº 4, p.1104-1109, october 2000.
- [32] MUSCAS, C.; LOCCI, N. Hysteresis and eddy currents compensation in current transformers. IEEE transactions on power delivery, vol. 16, nº 2, p.154-159, april 2001.
- [33] SAWA, T.; KUROSAWA, K.; KAMINISHI, T.; YOKOTA, T. Development of optical instrument transformers. IEEE transactions on power delivery, vol. 5, nº 2, p.884-891, april 1990.
- [34] YANG, L.; DOLLOFF, P.A.; PHADKE, A.G. A microprocessor based bus relay using a current transformer saturation detector. IEEE, p.193-202, 1990.
- [35] LOCCI Nicola and MUSCAS Carlo. Histeresis and Eddy Currents Compensation in Current Transformers, IEEE Transactions on power delivery, vol.16, no. 2, april 2001.
- [36] ELETROSUL. Treinamento em equipamentos de pátio de subestações – Módulo: Transformadores para instrumentos, Coordenação Geral, Coordenação Técnica. Outubro/2001.

- [37] SERMARINI, ANDRÉ LUIZ, CTEEP. Aspectos técnicos e gerenciais da manutenção em instalações elétricas: Estudo de caso da manutenção preventiva centrada em confiabilidade. XVI SNPTEE, São Paulo 2001.
- [38] ELETROSUL. Levantamento da característica de magnetização dos núcleos de transformadores de corrente. Manual de manutenção – MM, Módulo: Equipamentos de pátio, Capítulo: Instruções de manutenção, Seção: Transformadores de corrente. Novembro,2001.
- [39] ELETROSUL . Medição da corrente de excitação em transformadores. Manual de manutenção MM, Módulo: Equipamentos de pátio, Capítulo: Instruções de manutenção, Seção: Transformadores de corrente. Novembro,2001.
- [40] IEEE 76CH1130-4PWR: Transient response of current transformers: Std 242: Recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems. New York, January 1976.
- [41] BARP, A.M. Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistemas de medição em temperatura.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 120p. Florianópolis, 2000.
- [42] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição NBR ISO 10012-1, Nov/1993.
- [43] FLESCHE C. A.; BARP A. M. Avaliação a priori da incerteza em sistemas modulares de medição de temperatura. In: IV Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIDIM/99. *Anais em CDROM*. Santiago de Chile, 23 a 26 nov. 1999b.
- [44] NORMA - NIT-DICLA-033 – Política para implementação da estimativa de incerteza de medição em laboratórios de ensaio. INMETRO. Mar/2003.

- [45] CARNEIRO, J.C. Aspectos de confiabilidade de equipamentos elétricos de alta tensão constatados na inspeção e ensaios de recebimento em fábrica: subsídios para avaliação da qualidade do produto e suas conseqüências para o fornecimento de energia elétrica. XVI SNPTEE, Fóz do Iguaçu. 1999.
- [46] CAVICHIOLI, Nelson; PASQUA, Maurício. Gestão da manutenção em sistema de transmissão de energia: Uma experiência de sucesso, XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica. SIQUEIRA, Campinas, 21 a 26 outubro, 2001.
- [47] FLESCHE, Carlos A. Estruturação de um sistema de simulação de instrumentos de medição. 2001. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Fpolis, 2001.
- [48] SCHOUKENS, J.; PINTELON, R.; VANDERSTEEN, G. A sinawave fitting procesure for characterizing data acquisition channels in the presense of time base distortion and time jitter. IEEE Transactions on Instruments and Measurement, v.46, n.4, p.1005-1010, Aug. 1997.
- [49] TRYLING, D. P. Eletronics for the new century. Electrical Apparatus. V.53, n.3, p49-50, Mar.2000.
- [50] JAIN, R. The Art of Computer Systems Performance Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [51] GLENN O.A., WAYNE W. M. A perspective on data analysis, Site [www.sensorsmag.com/articles/](http://www.sensorsmag.com/articles/), December 2001. Acesso em novembro, 2003.
- [52] KADIONIC, Patrice. Les bus industriels – École Nationale Supérieure Electronique, Informatique et Radiocommunications, ENSEIR. Bordeaux. Site <http://www.enseirb.fr/~kadionik>. Acesso em novembro, 2003.

- [53] CEJER, Mark. Choises, choises, choises, part.1: Open vc. Closed architectures, proprietary packages and programming language environments. Site [www.senorsmag.com/articles/](http://www.senorsmag.com/articles/), September 2002. Acesso em novembro, 2003.
- [54] NATIONAL INSTRUMENTS - Data Acquisition Fundamentals – Application note 007, Site <http://www.natinst.com>. Acesso em julho 2003.
- [55] FLESCHE, C. A.; CAMARANO, D. M. Proposta de metodologia de seleção dos módulos físicos e lógicos de um processo de medição automatizado de temperatura com transdutores dos tipos termopar, termoresistor e termistor. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais*. v.3., p.269-274. Brasília, dez. 1993a.
- [56] BLANK, M. *Sistematização das especificações metroológicas em sistemas automatizados de aquisição de sinais*. Florianópolis, 1996. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [57] BARP, A., FLESCHE, C. A. – Avaliação da incerteza de medição durante o projeto de cadeias de medição automatizadas. III SEMETRO – Seminário Internacional de Metrologia Elétrica; Rio de Janeiro, RJ, 15 a 17/09/1998, *Anais* em CDROM.
- [58] INMETRO . Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia. Versão Brasileira do "*Vocabulary of basic and general terms in metrology*" publicado em 1993 pela ISO/IEC/OIML/BIPM. Rio de Janeiro: Mar 1995.
- [59] FLESCHE, C. A.; TRONCOSO, L. S. Sistematização da análise das fontes de erros na multiplexação automatizada de extensômetros resistivos. In: V Congresso Nacional de Ingeniería Mecánica. *Anais*. Punta Arenas, dez. 1992.
- [60] SCHRAFF, Fred. Choosing differential or single-ended measurements for data acquisition systems, [www.senorsmag.com/articles/](http://www.senorsmag.com/articles/), December 1997. Acesso em novembro, 2003.

- [61] FLESCCH, C. BLANK, M., - Análise comparativa entre erros metrológicos decorrentes da multiplexação automatizada obtidos em análise teórica e experimental. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica; Baurú, SP, 12/1997; Anais.
- [62] FLESCCH, C. A.; SCAVONE, R. Aplicación de sistemas expertos para determinar intervalos de calibración de instrumentos de medición en bancos de ensayo. Revista Internacional Indexada *Información Tecnológica*, ISSN 0716-8756. v. 9, n.2, p.169-176, 1998.
- [63] FLESCCH, C. A. *Metrologia*. Apostila da disciplina Metrologia e Eletrônica para Experimentação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis: Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC, 2000.
- [64] FLESCCH, C. A.; FRANÇA, L. R. G. Sistema de gerenciamento de instrumentos de controle geométrico: caracterização e desenvolvimento de um protótipo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. *Anais*. v.3, p.1551-1554 Brasília, dez. 1993b.
- [65] POTTER, David– Programmable lowpass filters for PC-Based Data Acquisition (DAQ) Boards, NATIONAL INSTRUMENTS – Application Note 068. Site [www.ni.com/](http://www.ni.com/). Acesso em janeiro, 2004.
- [66] CRISTALTI, L.; FERRERO, A. PIURI, V. Programmable instruments, virtual instruments and distributed measurement systems: what is really useful, innovative and technically sound? IEEE Instruments Measurement Magazine, V.2, n.9, p.20-27, Sept.1999.
- [67] NATIONAL INSTRUMENTS – Tutorial Labview – Jan.1996. Site: [www.ni.com/](http://www.ni.com/). Acesso em fevereiro, 2003.
- [68] NATIONAL INSTRUMENTS. Taking Your Measurements to the Web with Labview. Austin, 2002.Site: [www.ni.com/](http://www.ni.com/). Acesso em fevereiro, 2003.

[69] NATIONAL INSTRUMENTS - Introduction to LabVIEW 7 and Data Acquisition, Site: [www.ni.com/](http://www.ni.com/). Acesso em outubro, 2002.

[70] NATIONAL INSTRUMENTS - NI Measurement Studio 7.0 – Extensible Architectures and .NET Measurement Designers Deliver Flexibility and Robust I/O Connectivity. Site [www.ni.com/](http://www.ni.com/). Acesso em novembro 2003.

[71] NATIONAL INSTRUMENTS – Alternative GPIB interfaces. Site [www.ni.com](http://www.ni.com). Acesso em março, 2004.

[72] NATIONAL INSTRUMENTS - Using a GPIB Controller to Talk to or from a Serial Device. Site [www.ni.com](http://www.ni.com). Acesso em março, 2004.

[73] NATIONAL INSTRUMENTS - Connect RE232/485 serial instruments to USB with the NI USB-232 and NI USB-485. Site [www.ni.com](http://www.ni.com). Acesso em março, 2004.

[74] NATIONAL INSTRUMENTS - USB Overview. Site [www.ni.com](http://www.ni.com). Acesso em março, 2004.

[75] Technical Note – VXI Bus Overview - VXI Technology Site. <http://www.vxitech.com>. Acesso em novembro de 2003.

[76] The VXI Platforme – Today and the future - VXI Technology Site. <http://www.vxitech.com>. Acesso em novembro de 2003.

[77] NATIONAL INSTRUMENTS-User Manual 6023E/6024E/6025E – Multifunction I/O Devices for PCI, PXI, CompactPCI, and PCMCIA Bus Computers - National Instruments. Site <http://www.ni.com>

[78] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION - General purpose 6-pin phototransistor optocouplers – 2003.

[79] FLESCHE, A.C. Sistema de garantia da confiabilidade metrológica – Manual de manutenção Eletrosul – Módulo: Qualidade, Capítulo: Instrução organizacional, Seção: Confiabilidade metrológica. Junho/2003.

[80] NORMA - NIT-DICLA-004 – Critérios específicos para calibração de instrumentos analógicos e digitais de medição na área de eletricidade. INMETRO. Mar/2002.

[81] NORMA - NIT-DICLA-021 – Expressão da incerteza de medição. INMETRO. Mai, 2003.

[82] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO) et al. Guia para Expressão da Incerteza de Medição. Edição Brasileira do "Guide of Uncertainty in Measurements" . 2. ed. Rio de Janeiro, 1998.

[83] ARRI, E. et al. On the application of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement to measuring instruments. Elsevier Measurement, Orlando, n. 16, 1995.

[84] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Expressão da Incerteza de Medição na Calibração. Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02. Rio de Janeiro, 1999.

[85] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Expressão da Incerteza de Medição na Calibração - Exemplos. Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02-S1. Suplemento 1 ao EA-4/02. Rio de Janeiro, 1999.

[86] ALBERTAZZI, A. Apostila de metrologia. Laboratório de Metrologia e Automação – LABMETRO. Fev/2002.

[87] SOLON M. F. Fundamentos de Medidas Elétricas. 2 ed. Rio de Janeiro, 1981.



[88] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Normas de gestão da qualidade e garantia da qualidade - Parte 4: Guia para gestão da dependabilidade – NBR ISO 9000-4/1993.

[89] LEROUX, Le transformateur. Site:

<http://www.gel.usherbrooke.ca/leroux/projet/data/Moteur/chap08.htm>. Acesso em março, 2003.

[90] NATIONAL INSTRUMENTS – Calibration: Accuracy and Uncertainty. Site:

[www.ni.com/](http://www.ni.com/). Acesso em novembro, 2003.

[91] NI 6023E/6024E/6025E Family Specification – Atualizado em setembro de 2003.

Site <http://www.ni.com> . Acesso em novembro, 2003.