



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO



Redução de Erros de Exatidão em Transformadores de Corrente para Medição de Energia Elétrica

Leonardo Telino de Meneses

Orientador: Prof. Dsc. André Laurindo Maitelli

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de ordem PPgEEC: D195
Natal, RN, Junho de 2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Meneses, Leonardo Telino de.

Redução de erros de exatidão em transformadores de corrente para medição de energia elétrica / Leonardo Telino de Meneses. - 2017.

125 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dsc. André Laurindo Maitelli.

1. Transformador de Corrente - Tese. 2. Erros de Exatidão - Tese. 3. Circuitos de Controle - Tese. 4. Amplificadores Operacionais - Tese. 5. Algoritmos - Tese. I. Maitelli, André Laurindo. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.314

Redução de Erros de Exatidão em Transformadores de Corrente para Medição de Energia Elétrica

Leonardo Telino de Menezes

Tese de Doutorado aprovada em 9 de junho de 2017 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



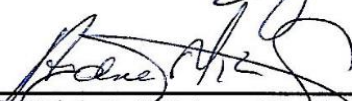
Prof. Dsc. André Laurindo Maitelli (Orientador)

DCA/UFRN



Prof. Dsc. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo (Membro do PPgEEC)

DCA/UFRN



Prof. Dsc. Andrés Ortiz Salazar (Membro do PPgEEC)

DCA/UFRN



Prof. Dsc. Manoel Alves Filho (externo à instituição)

UA3/IFPB



Prof. Dsc. José Bezerra de Menezes Filho (externo à instituição)

UA3/IFPB

Agradecimentos

Ao professor Dsc. André Laurindo Maitelli meu orientador no mestrado e no doutorado, pela orientação e que sempre acreditou em mim, sou muito grato.

Ao professor Dsc. Fábio Meneghetti Ugolino de Araújo, professor e incentivador, e que também sempre acreditou em mim.

Aos colegas de curso : Nivaldo Júnior, professor do IFRN e Márcio Emanuel, professor do IFPB - meu ex-aluno e depois colega de mestrado e doutorado - pelas excelentes pessoas que são, pela troca de ideias, pelo incentivo.

Ao executivo Haroldo Pimenta da MARANGONI MARETTI que gentilmente forneceu características físicas e eletromagnéticas dos transformadores de corrente por eles fabricados.

Ao engenheiro Fernando Ribeiro da BRASFORMER BRASPEL que gentilmente forneceu características físicas e eletromagnéticas dos transformadores de corrente por eles fabricados.

Ao professor José Wallington Pereira Leal do IFPB que disponibilizou material para os experimentos com circuitos de controle , pelas discussões teóricas e pela orientação nas montagens.

Resumo

Esta pesquisa direciona esforços e propõe uma solução para mitigar erros de exatidão em transformadores de corrente específicos para medição de energia elétrica. Duas soluções são desenvolvidas: a primeira é um sistema de controle em tempo real que inibe o fornecimento da energia entregue ao transformador de corrente -TC pelo seu circuito magnético e que retira esta energia do circuito de controle e não mais da corrente primária que está sendo medida inibindo a produção da corrente de excitação pela energia que circula no primário do transformador de corrente; a segunda é o desenvolvimento de um algoritmo de compensação dos erros a partir do conhecimento das características físicas, elétricas e magnéticas do transformador de corrente e da memória de massa das correntes medidas no secundário do TC, identificando a corrente de excitação demandada em cada intervalo de integração, compensando essa corrente e recalculando a energia medida. Testes em laboratório demonstram a validade do primeiro método com um nível de redução de erro superior a 50%. Aplicações algorítmicas em memória de massa de TCs demonstram a validade e o potencial do segundo método. A teoria e a prática são discutidas e se complementam nas abordagens analíticas, experimentais e operacionais efetivadas ao longo da pesquisa.

Palavras-chave: Transformador de Corrente. Erros de Exatidão. Circuitos de Controle. Amplificadores Operacionais. Algoritmos. Compensação.

Abstract

This research directs efforts and proposes a solution to mitigate errors of accuracy in specific current transformers for electric energy measurement. Two solutions are developed: the first is a real-time control system that inhibits the supply of energy delivered to the CT – current transformer by its magnetic circuit and which withdraws this energy from the control circuit and no longer from the primary current being measured, inhibiting the production of the excitation current by the energy circulating in the primary of the current transformer; the second is the development of an error compensation algorithm based on the knowledge of the physical, electrical and magnetic characteristics of the current transformer and the mass memory of the currents measured in the CT secondary, identifying the excitation current demanded in each integration interval, compensating this current and recalculating the measured energy. Laboratory tests demonstrate the validity of the first method with an error reduction level of more than 50%. Algorithm applications in mass memory of CTs demonstrate the validity of the second method. The theory and the practice are discussed and complement each other in the analytical, experimental and operational approaches carried out throughout the research.

Key words: Current Transformer. Accuracy Errors. Control Circuits. Operational Amplifiers. Algorithms. Compensation.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. TRANSFORMADORES DE CORRENTE	11
2.1 Princípio de Funcionamento e Erros de Exatidão	11
3. MÉTODOS PROPOSTOS PARA A CORREÇÃO DE ERROS	31
3.1 Metodologia para Compensação de Erros em TCs através de Algoritmo.....	31
3.1.1 Definições.....	32
3.1.2 O modelo do transformador de corrente.....	34
3.1.3 Influência nos erros em função das impedâncias envolvidas	35
3.1.4 Influência nos erros em função das correntes envolvidas	36
3.1.5 Influência nos erros em função da característica B x H do núcleo.....	37
3.1.6 Proposta de algoritmo para compensação dos erros em TCs	42
3.2 Metodologia para Compensação dos Erros em TCs	46
3.2.1 Indutância do fluxo não concatenado (fluxo disperso).....	46
3.2.2 A solução proposta para a compensação	47
3.2.3 Quedas de tensão nos circuitos secundários de TCs	48
3.2.4 Eletrônica analógica <i>versus</i> eletrônica digital	50
3.2.5 Análise da solução de controle por diagramas de Bode	51
4. RESULTADOS	63
4.1 TC sem o Circuito de Controle e Compensação	63
4.2 TC com o Circuito de Controle e Compensação	65
4.3 Resultados Experimentais com Protótipo.....	69
4.4 Resultados Utilizando Algoritmo de Compensação.....	71
5. CONCLUSÃO	75
5.1 Propostas para Trabalhos Futuros	77
5.1.1 Circuito de compensação e propostas futuras	77
5.1.2 Algoritmo de compensação e propostas futuras	78

Referências Bibliográficas	81
Apêndice	87
A.1 Fluxograma de compensação com algoritmo.....	87
A.2 Algoritmo TESTE_TESE_1.....	88
A.3 Algoritmo TESTE_TESE_2.....	99
Anexo.....	121

Lista de Figuras

Figura 1. 1 –Transformadores de corrente.....	02
Figura 2. 1 –O transformador de corrente ideal.....	12
Figura 2. 2 –O transformador de corrente real com carga.....	16
Figura 2. 3 –Diagrama fasorial do transformador de corrente.	17
Figura 2. 4 –Curva da corrente de excitação <i>versus</i> corrente primária de um TC.....	21
Figura 2. 5 - Paralelogramos de exatidão para classes 0,3 e 0,3S.	25
Figura 2. 6 - Paralelogramos de exatidão para classes 0,6 e 0,6S.	26
Figura 2. 7 - Paralelogramos de exatidão para classe 1,2.....	27
Figura 3. 1 - Circuito equivalente de TC referido ao secundário.	34
Figura 3. 2 - Característica $H \times B_m$ do núcleo de ferro de um TC.....	40
Figura 3. 3- Estágio de circuito com derivativo teórico.....	53
Figura 3. 4 – Estágio de circuito de controle com derivativo prático.....	54
Figura 3. 5 – Diagrama de Bode genérico da função de transferência do TC sem compensação....	55
Figura 3. 6 – Diagrama de Bode da função V_2 versus V_b	57
Figura 3. 7 – Diagrama de blocos do transformador de corrente compensado.....	58
Figura 3. 8 – Diagrama de Bode da FT do processo em série com o controle	59
Figura 3. 9 - Diagrama de blocos do sistema compensado e com ganho.....	59
Figura 3. 10- Diagrama de Bode da FT com controle e ganho adicional.	60
Figura 4. 1 -TC conectado a medidor sem circuito de compensação para redução de erros	64
Figura 4. 2 -Sinais das correntes primária e secundária do TC sem compensação.	65
Figura 4. 3 -TC conectado a medidor com circuito de compensação para redução de erros.	66
Figura 4. 4 –Sinais das correntes primária e secundária do TC com compensação.....	68
Figura 4. 5 -Protótipo do circuito de controle: detalhe da montagem dos componentes.....	70
Figura 4. 6 -Curva de magnetização de TC 15-5 A / 13,8 kV.	72

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 –Relações nominais simples de transformadores de corrente.	13
Tabela 2. 2 –Corrente primária <i>versus</i> corrente de excitação.	22
Tabela 2. 3 –Limites de erros de corrente para TC de medição.	23
Tabela 2. 4–Limites de defasagem de ângulo para TC de medição.	23
Tabela 3. 1–Memória de massa de V, I e $\cos\phi$ para algoritmo Teste_Tese_1.	44
Tabela 3. 2–Densidade de campo magnético <i>versus</i> intensidade de campo magnético.	45
Tabela 3. 3–Parâmetros do transformador de corrente.	48
Tabela 4. 1–Erros do TC sem e com o circuito de controle.	69
Tabela 4. 2–Resultados da compensação com o protótipo.	69
Tabela 4. 3–Curva de magnetização do aço E-004.	73

Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\arg \widehat{I_1 I_2}$	Ângulo entre os fasores I_1 e o inverso de I_2
A	Área da seção transversal do núcleo de um TC
$ABNT$	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$ANEEL$	Agência Nacional de Energia Elétrica
B	Densidade de Campo Magnético
B_m	Densidade de Campo Magnético na curva característica $H \times B_m$
AO	Amplificador Operacional
ϵ_r	Erro de relação do TC
f	Frequência em ciclos/segundo
F	Força magnetomotriz que supre magnetização e perdas no núcleo do TC
F_t	Fator térmico
FT	Função de Transferência
FCR	Fator de Correção de Relação para um ponto de operação específico
G	Função de Transferência no domínio da frequência
H	Intensidade de Campo Magnético
H_m	Campo magnético referente à corrente de magnetização
H_o	Campo magnético referente à corrente de excitação
H_p	Campo magnético referente à corrente de perdas por histerese e Foucault
i_-	Corrente drenada pelo terminal inversor de um AO
i_+	Corrente drenada pelo terminal não inversor de um AO
i_{Rentra}	Corrente que circula em R_{entra}
i_{Rretro}	Corrente que circula em R_{retro}
I_1	Corrente real no enrolamento primário do TC
I_2	Corrente real no enrolamento secundário do TC
I_1^*	Corrente secundária refletida no primário do TC
I_1^*	Soma vetorial entre I_1 e I_0
I_2	Corrente no enrolamento secundário do TC
I_m	Corrente de magnetização no núcleo do TC

I_n	Corrente nominal do TC
I_{1n}	Corrente nominal no enrolamento primário do TC
I_{2n}	Corrente nominal no enrolamento secundário do TC
I_p	Corrente de perdas no núcleo do TC
I_0	Corrente de excitação do TC
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IFPB</i>	Instituto Federal da Paraíba
<i>IFRN</i>	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
k	Relação real do TC, para um ponto de operação específico, igual a I_1/I_2
k_n	Relação nominal do TC, igual a N_2/N_1
l	Comprimento médio do núcleo do TC
L_1	Indutância do enrolamento primário referida ao secundário
L_2	Indutância referente ao fluxo disperso no enrolamento secundário
L_b	Indutância referente à reatância indutiva X_{Lb}
L_m	Indutância referente à reatância do ramo de magnetização.
<i>MATLAB</i>	<i>Matrix Laboratory</i>
N	Constante utilizada para aproximação do derivativo prático
N_1	Número de espiras do enrolamento primário do TC
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário do TC
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P_1	Terminal de entrada de corrente primária do TC
P_2	Terminal de saída de corrente primária do TC
<i>PPgEEC</i>	Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação
R_2	Resistência ôhmica da bobina secundária do TC
R_b	Resistência ôhmica do sensor de corrente do medidor de energia elétrica
R_{entra}	Resistência de entrada de circuito com amplificador operacional
R_f	Resistência ôhmica da cabeção do circuito secundário do TC
R_p	Resistência de perdas ôhmicas no núcleo de ferro (Foucault e histerese)
R_{retro}	Resistência de realimentação de circuito com amplificador operacional
S_1	Terminal de saída de corrente secundária do TC
S_2	Terminal de entrada de corrente secundária do TC

T	Período crítico
TC	Transformador de Corrente
T_d	Constante derivativa em circuito com amplificador operacional
TI	Transformador para instrumento
TP	Transformador de Potencial
$UA3$	Unidade Acadêmica de Indústria
$UFRN$	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
U_2	Tensão nos terminais secundários do TC
U_2	Tensão V_2 menos a queda de tensão em Z_2
v_{entra}	Tensão de entrada de circuito com amplificador operacional
$v_{saída}$	Tensão de saída de circuito com amplificador operacional
V_1	Tensão no enrolamento primário do TC
V_2	Tensão induzida no enrolamento secundário do TC
V_b	Tensão no sensor de corrente do medidor de energia elétrica
V_c	Tensão de compensação gerada pelo circuito de controle
VA	Carga secundária do TC quando a corrente secundária é a nominal
X_2	Reatância de fluxo disperso do TC
X_{Lb}	Reatância indutiva do sensor de corrente do medidor de energia elétrica
Y_m	Admitância do ramo de magnetização no modelo do TC
Z_1^*	Impedância Z_2 refletida no primário do TC
Z_2^*	Impedância Z_1 refletida no secundário do TC
Z_1	Impedância do enrolamento primário do TC
Z_2	Impedância do enrolamento secundário do TC
Z_{2t}	Impedância total do circuito secundário do TC
Z_{fb}	Impedância do circuito secundário do TC
Z_m	Impedância do ramo de magnetização no modelo do TC
α	Ângulo entre a corrente de excitação e a corrente de magnetização
β	Ângulo entre I_1 e I_1^*
β	Erro de ângulo ou erro de fase do TC
Δ_1	Diferença entre I_1 e I_2 no semiciclo superior
Δ_2	Diferença entre I_1 e I_2 no semiciclo inferior
δ	Ângulo entre I_2 e V_2

φ	Fluxo magnético no núcleo do TC
γ	Ângulo de fase no intervalo aceitável do paralelogramo de exatidão
θ_2	Ângulo entre I_2 e U_2
μ	Permeabilidade magnética

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A medição de energia elétrica em circuitos de alta tensão e alta corrente ou em circuitos de baixa tensão e alta corrente não pode ser realizada com a conexão direta do medidor no circuito que se quer medir a corrente porque não são fabricados medidores para esses níveis de tensão e corrente em função de custos, praticidade e segurança.

A solução encontrada é a utilização de transformadores de potencial – TPs e transformadores de corrente – TCs, conforme o caso. TPs são utilizados para isolar os medidores dos altos níveis de tensão. TCs são utilizados para reduzir as correntes elétricas a níveis compatíveis com o suportável pelos medidores. Para a obtenção dos reais níveis de corrente e de tensão do circuito primário dos TCs e TPs, multiplicam-se os valores medidos nos secundários desses transformadores de instrumento – TIs pelas suas constantes nominais de placa, de forma que os valores de corrente e de tensão do circuito primário são identificados de forma indireta.

Os transformadores de corrente são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário a estes instrumentos possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados. Na sua forma mais simples, eles possuem um primário, geralmente de poucas espiras, e um secundário no qual a corrente nominal transformada é padronizada em 5 A. Existem também TCs de corrente secundária padronizada igual a 1 A e a 2 A, mas com uma representatividade pequena no universo de TCs.

Os transformadores de corrente são utilizados para suprir aparelhos que apresentem baixa resistência elétrica, tais como amperímetros, relés de indução, relés eletrônicos, bobinas de corrente de relés diferenciais, medidores de energia elétrica e medidores de potência elétrica.

A figura 1.1. apresenta transformadores de corrente para medição de energia elétrica nos níveis de tensão 0,6 kV; 15 kV; 22kV e 138 kV.

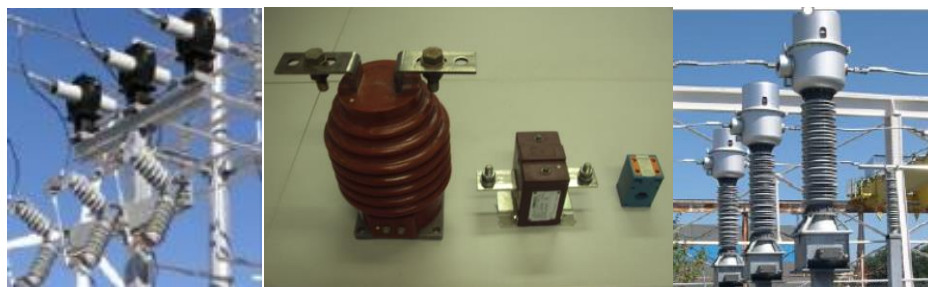


Figura 1. 1 – Transformadores de Corrente.

Fonte: Elaboração própria.

Os TCs transformam, através do fenômeno de conversão eletromagnética, correntes elevadas, que circulam no seu primário, em pequenas correntes secundárias, segundo uma relação fixa de transformação, entregando frações conhecidas das correntes primárias para os medidores, de acordo com a exatidão estabelecida, e assim torna possível que se conheça a corrente primária através do conhecimento da corrente secundária e de uma constante de proporcionalidade.

A corrente primária a ser medida, circulando no enrolamento primário, cria um fluxo magnético alternado que faz induzir as forças eletromotrizes V_1 e V_2 , respectivamente nos enrolamentos primário e secundário.

Dessa forma, se nos terminais primários de um TC, cuja relação nominal de transformação - por exemplo - é 20, circular uma corrente de 100 A, obtém-se no secundário a corrente de $\frac{100}{20} = 5$ A, caso o TC seja de corrente padronizada 5 A.

No processo de redução de valores e multiplicação dos valores reduzidos por constantes de proporcionalidade, surgem erros de exatidão nas componentes fasoriais de corrente e conseqüentemente na corrente medida pelo sistema de medição. Esta pesquisa é direcionada à redução de erros em TCs de medição, com foco em TCs para medição de energia elétrica, os quais são ocasionados pelas limitações do seu circuito magnético, pelo nível de corrente circulando no barramento primário e também pelas cargas impostas ao secundário do TC.

O transformador de corrente consiste de um núcleo de ferro laminado o qual contém, em sua forma mais simples, duas bobinas. Uma das bobinas - a primária - é conectada em série com a linha, com a corrente que se quer medir. A outra bobina - a secundária - é conectada ao medidor da corrente elétrica ou ao medidor de energia elétrica, notadamente ao sensor de corrente destes medidores. A bobina primária não necessita necessariamente

estar enrolada no núcleo do TC, sendo que na maioria dos casos o condutor primário simplesmente passa através do núcleo laminado, constituindo uma única espira primária. Quando o primário é constituído de uma bobina enrolada no núcleo o TC é dito do tipo enrolado. Quando o primário é simplesmente um condutor passando através do núcleo do TC, então o transformador de corrente é dito do tipo barra.

O núcleo de ferro do TC e seus enrolamentos são projetados de forma que apenas uma pequena fração de corrente na linha primária seja necessária para magnetizar o núcleo e criar força magnetomotriz suficiente para fazer surgir corrente no circuito secundário. A manutenção de um campo magnético alternado no ferro requer energia, requer força magnetomotriz - F , e uma fração da corrente primária é utilizada para fornecer força magnetomotriz que suprirá a magnetização e as perdas no núcleo. Desta forma, os ampéres espira primários I_1N_1 são a soma vetorial de:

1. I_2N_2 , os ampéres espira requeridos para equilibrar os ampéres espira secundários;
2. I_mN_1 , os ampéres espira requeridos para manter o fluxo φ ;
3. I_pN_1 os ampéres espira consumidos pela histerese ou perdas no ferro e pelas correntes parasitas ou correntes de Foucault.

Uma vez que a impedância secundária é constante, então V_2 e φ são proporcionais à corrente secundária. Assim como a corrente secundária é uma reprodução escalonada da corrente primária, o fluxo varia com a corrente da carga primária, e depende da curva $B \times H$ do ferro utilizado no núcleo do TC, porque cada material magnético vai oferecer maior ou menor permeabilidade e assim maior ou menor densidade de fluxo. H é o vetor intensidade magnética, ou seja, as linhas de campo com potencial para magnetizar um material. B é o vetor campo magnético efetivo, ou densidade de fluxo, dado um H e uma permeabilidade μ , onde $B = \mu H$. Se plotarmos um gráfico $B \times H$ para determinado material, obteremos sua curva de magnetização, que inicia linear e termina de forma assintótica, isso significa que os dipolos magnéticos do material na região de saturação já se encontram plenamente alinhados e não há como aumentar o campo magnético efetivo, por mais que se aumente a intensidade de campo magnético.

A corrente primária I_1 e a secundária I_2 são diferentes em módulo e em ângulo em função da existência das componentes I_mN_1 e I_pN_1 . A importância de manter I_m e I_p baixas em comparação com o valor de I_1 é então óbvia, já que estas componentes são a causa dos erros do TC. Os erros de relação e de fase dependem da corrente primária, do fluxo φ , da

carga secundária e por consequência da magnitude e do ângulo da corrente fasorial de excitação $I_0 = I_m + I_p$.

A impedância conectada ao enrolamento secundário tem influência nos erros, porque aumenta a magnetização e as correntes de perdas no núcleo necessárias para suprir a energia entregue à carga secundária.

O tipo de material usado no ferro do núcleo tem também sua influência. Se o fluxo ϕ fosse diretamente proporcional à I_m , então os erros do TC seriam quase constantes em todas as cargas, para uma dada impedância secundária. A curva $B \times H$ de um material magnético, contudo, não é uma função linear, de forma que, em geral, quanto maior a densidade de fluxo, o valor relativo da corrente de magnetização é maior; e como consequência há um efeito aumentado nos erros do TC.

Se um TC é construído com o número de espiras primárias e secundárias que satisfazem exatamente a relação nominal, então o erro de relação será negativo em carga nominal. Como o erro de relação torna-se mais negativo à medida que a carga decresce, os erros em cargas mais baixas ficam fora de seus limites. Para contornar este problema, o erro de relação é forçado a ser mais positivo em carga nominal por redução das espiras secundárias.

Carga secundária excessiva aumenta os erros do TC. Os erros do TC dependem dos valores de I_m e I_p com relação ao valor da corrente primária I_1 . Os erros podem ser reduzidos se I_m e I_p forem mantidos os menores possíveis. Mas, para uma dada corrente primária a tensão secundária é diretamente proporcional ao valor da impedância – carga – secundária, e assim o fluxo ϕ e também I_m e I_p são aproximadamente proporcionais à impedância secundária em uma dada carga. De forma que, se a carga secundária excede um certo valor, os erros excedem os valores permissíveis. É por esta razão que nos dados de placa de TCs consta a carga secundária máxima para a exatidão declarada. Em função da norma NBR 6856/2015 a carga secundária é expressa em VA referidos à corrente nominal secundária.

Em função dos erros intrínsecos e inevitáveis no processo construtivo de um TC, como acima exposto, torna-se necessário solucionar ou mitigar o problema por meios externos. Este trabalho tem esta função, de contribuir com proposta eficaz de redução de erros em transformadores de corrente. Diversos pesquisadores têm-se debruçado sobre o tema, estudando uma série de fatores de influência, tais como: Luciano (2011)(2013) em suas abordagens sobre novos materiais para o núcleo; Kang et al (1997) (2011) em seus estudos sobre os efeitos provocados pela distorção na forma de onda do secundário quando

o núcleo atinge a saturação em condições extremas de carga; Yu et al (2001) em suas pesquisas sobre redes neurais artificiais como ferramenta para correção de correntes secundárias distorcidas de TCs devido à saturação; Zheng et al(2009) com suas propostas de algoritmos que removem os efeitos da histerese. Estes fatores de influência não serão estudados nesta pesquisa, porque aqui o nosso objetivo é mitigar erros de exatidão em TCs convencionais para medição de energia elétrica, conforme justificaremos no parágrafo seguinte.

A viabilidade técnica e financeira e o propósito dos transformadores de corrente para medição de energia elétrica – objeto central da nossa pesquisa - impõe que os mesmos continuem massivamente a serem fabricados e utilizados com núcleo ferro magnético. Excluem-se então da abordagem investigativa neste trabalho, procedimentos direcionados a TCs de proteção, tais como o comportamento do TC em situações fora do regime permanente ou na região de saturação do material magnético; excluem-se também estudos direcionados à utilização de novos materiais no núcleo do TC tais como os nano cristalinos. TCs óticos, equipamento há duas décadas pesquisado e posto em operação de forma pontual (não existem mais do que nove unidades instaladas no Brasil), apesar de ser uma solução que não consome corrente de excitação - portanto sem problemas de exatidão – não teve até aqui aceitação de mercado em função de alto custo e necessidade de instrumentação de conversão associada, motivo porque também não é objeto de investigação nesta pesquisa.

Estas exclusões justificam-se porque o foco desta pesquisa é a solução para os milhares de TCs já instalados e que continuam a ser fabricados e instalados no formato convencional de núcleo ferro magnético. A busca da solução é então direcionada a estes TCs tradicionais, um mercado consolidado e que não deverá ser substituído nos próximos anos.

Em perspectiva histórica, para que se conheça a preocupação e as soluções propostas na linha do tempo mencionamos a seguir pesquisas no sentido de minimizar erros de exatidão em transformadores de corrente que têm sido relatadas em artigos e depósitos de patentes desde a primeira metade do século XX.

Brooks e Holtz (1922) abordaram o tema propondo um transformador de corrente em dois estágios, sendo o segundo estágio responsável por compensar a corrente de excitação.

Ferns(1949) menciona em sua obra o método do TC de dois enrolamentos com suas vantagens e desvantagens.

Hobson(1953) aborda o assunto, propondo um transformador de corrente de fluxo zero, sugerindo que a redução do fluxo no núcleo de um TC é conseguida com o forneci-

mento de uma tensão que irá suprir a necessária tensão secundária que alimenta as cargas longitudinais do transformador de corrente, cuja compensação é conseguida com um segundo TC que denominou de transformador compensador.

Sankaran e Murti (1971) relatam o desenvolvimento de um circuito eletrônico empregando dois resistores de precisão e um amplificador eletrônico, destacando que a proposta compensa apenas o erro de relação.

Xu et al (1996) apresentam uma proposta de compensação via um modelo externo de TC, cuja corrente de magnetização não seria produzida no TC original e sim no modelo externo, a qual é enviada ao circuito de carga secundária do TC original, destacando que o modelo externo de TC faz uso de duplo núcleo e adicionalmente um amplificador operacional para conseguir a corrente de excitação suplementar necessária para reduzir a corrente de magnetização do TC original.

Um método por compensação eletrônica digital é proposto por Locci e Muscas (2000) fazendo uso da aquisição das correntes secundárias instantâneas, ajustando-as em relação à corrente de magnetização em cada instante, levando em conta os efeitos da histerese e multiplicando a corrente secundária pela relação de espiras mais o efeito da corrente de magnetização, e para tanto um sistema de aquisição de dados com microprocessador é utilizado.

Slomovitz(2000) propõe uma compensação sem utilizar enrolamentos secundários auxiliares e sem utilizar núcleos auxiliares, fazendo uso de sensor de corrente e amplificador operacional para o suprimento da corrente de magnetização que compense o fluxo necessário no TC principal.

Kang et al (1997) faz uma abordagem propondo o desenvolvimento de um algoritmo de compensação para transformadores de corrente de proteção.

Santos e Slomovitz (2006) sugerem uma técnica de compensação de erros de exatidão em TCs fazendo uso de elementos passivos, apenas com capacitor e transformador auxiliar. Slomovitz e Santos (2012) voltam ao tema em abordagem similar com compensação eletrônica enfatizando a melhoria da exatidão em TCs do tipo janela articulada.

Baccigalupi e Liccardo (2007) (2009) apresentam dois artigos, em cujas propostas sugerem um método para compensação de erros em transformadores de corrente baseado em dois passos:

a) realização de um curto circuito equivalente de tal forma que a corrente de magnetização não dependa da resistência da carga;

b) inserção de um circuito que gere uma tensão de compensação a qual venha a compensar a queda de tensão através dos parâmetros longitudinais do transformador.

Rashtchi et al (2008) fazem uma abordagem por algoritmo genético no projeto de transformadores de corrente de forma a minimizar erros de relação e de fase.

Zheng et al (2009) desenvolvem um algoritmo de compensação para um transformador de corrente de núcleo de ferro, que remove os efeitos das características de histerese do núcleo e que causam um erro entre a corrente primária e a corrente secundária.

Estudos de transformadores de corrente e suas possibilidades também edificam suporte de leitura e tomada de decisão para esta pesquisa, conforme a seguir:

Staudt (2009) propõe um algoritmo de simulação com base no circuito elétrico equivalente do TC para auxiliar no projeto destes dispositivos, e aborda também a utilização de materiais nano cristalinos para redução de perdas. Os desempenhos dos TCs e sua eficiência são examinados.

Lima (2009) estuda a utilização de transformadores de corrente óticos, uma solução para otimizar a exatidão, não obstante com limitante em custos de partida, quando comparados com os TCs indutivos convencionais. Vislumbra-se que no futuro, à medida que os custos sejam viáveis, a consolidação do transformador de corrente ótico possa ser estabelecida.

Os erros de exatidão de relação e de ângulo de fase em transformadores de corrente com núcleo ferromagnético para medição de energia elétrica é nesta pesquisa o elemento central de estudo cujo equipamento TC varia sua exatidão em função da corrente elétrica requerida pelo consumidor, das impedâncias do seu circuito secundário e das características do seu circuito magnético, apresentando adicionalmente inconsistência de exatidão quando submetido a correntes inferiores a 10% do seu valor nominal, porque neste ponto de operação a corrente de excitação torna-se mais representativa em comparação com a corrente sendo medida em função da não linearidade da curva corrente primária *versus* corrente de excitação.

Esta pesquisa desenvolveu-se inicialmente em torno de circuitos de controle inseridos no circuito secundário de transformadores de corrente e na sequência foi ampliada com o desenvolvimento de algoritmos de compensação através da coleta da memória de massa dos fasores corrente, tensão e fator de potência em sistemas de medição, utilizando-se esta memória de massa e a matriz de dados da curva $B \times H$ do núcleo do TC para via algoritmo efetivar-se a compensação dos erros.

A contribuição deste trabalho é evidenciada quando fica comprovada a possibilidade da redução de mais de 50% dos erros de exatidão em transformadores de corrente fazendo uso do circuito integrado TL084CN do fabricante ST, que compõe-se de quatro amplificadores operacionais, cujo custo deste CI é R\$ 1,40 (um real e quarenta centavos), por transformador de corrente, portanto R\$ 4,20 (quatro reais e vinte centavos) para uma medição completa com três transformadores de corrente. Conforme evidenciado em exemplo na seção 4.3, para uma unidade consumidora de grande porte, é alcançada uma economia de R\$ 1.100,00 (um mil e cem reais) por mês, com um investimento fixo inferior a R\$ 10,00 (dez reais).

A construção de algoritmo como segunda proposta é vislumbrada como uma solução ainda melhor do que a primeira com circuito de compensação, pois não existirão conexões com os TCs, e portanto inexistirá a possibilidade de abertura do circuito secundário do TC (um evento extremamente indesejável para a integridade do transformador de corrente) em qualquer momento futuro por defeito no hardware implantado, além de evitar mão de obra com montagem de circuitos e instalação em campo no painel de medidores / secundário dos transformadores de corrente. As rotinas em MATLAB concebidas e testadas são apresentadas, comentadas em detalhes, sendo um convite para o aprimoramento das mesmas.

Os inconvenientes de ambas propostas é a mudança das impedâncias do TC para cada modelo/fabricante de transformador de corrente, necessitando alterar os componentes para a solução por hardware de controle ou alterar os dados de entrada da rotina MATLAB para a solução por compensação algorítmica.

A estrutura de apresentação dos estudos realizados nesta pesquisa já introduzida por este capítulo 1, vem sequenciada da seguinte forma:

O capítulo 2 enfoca os princípios de funcionamento dos TCs e discute a causa dos erros.

O capítulo 3 propõe métodos para a correção de erros de exatidão em TCs de medição de energia elétrica, fundamenta a construção de um algoritmo para compensação de erros de exatidão em TCs e apresenta a teoria de suporte à compensação de erros em TCs por controle com circuito eletrônico.

O capítulo 4 apresenta os resultados, compreendendo simulações computacionais com circuitos de controle, testes com protótipos conectados a secundário de transformador

de corrente e operação de algoritmo desenvolvido durante a pesquisa para o cálculo dos erros e sua compensação.

A conclusão é o tema do capítulo 5; um retorno à introdução consolida-se na constatação do cumprimento das metas ali propostas, de soluções construídas embasadas na teoria e prática de controle da engenharia elétrica, nas possibilidades computacionais de algoritmos de compensação com suporte em dados coletados por supervisor em sistemas de medição, sintetizada nos resultados positivos, mitigadores de erros de exatidão em transformadores de corrente, um dos componentes de transdução de sinais de mesma grandeza física em sistemas de medição de energia elétrica.

Referências bibliográficas que suportaram a construção do conhecimento para a concepção desta pesquisa e materiais pertinentes a apêndice e anexo seguem ao final.

Capítulo 2

TRANSFORMADORES DE CORRENTE

As normas ABNT NBR 6821/1992 Transformador de Corrente - método de ensaio e ABNT NBR 6856/1992 Transformador de Corrente – especificação, estiveram em vigência durante 23 anos tendo sido revogadas em 2015 e substituídas pela ABNT NBR 6856/2015 que unificou os temas especificação e método de ensaio em um único documento seguindo a tendência internacional.

As normas IEC 60044-1:2003 e ABNT NBR 6856/2015 em vigência, aquela de abrangência internacional e essa de abrangência nacional, estabelecem os padrões de especificação e ensaios para transformadores de corrente de medição e de proteção, consolidando definições, condições de serviço, valores nominais, requisitos de projeto, requisitos de exatidão, requisitos de isolamento e de polaridade, marcações e procedimentos de ensaios de rotina e de tipo. O ANEXO desta tese reproduz termos e definições relevantes para melhor entendimento dos conceitos utilizados nesta pesquisa, de acordo com a norma ABNT NBR 6856/2015, a qual segue em muitos aspectos a IEC 60044-1:2003.

Este capítulo estuda os transformadores de corrente para medição com enfoque nas características de influência nos erros de exatidão, porque o objetivo deste trabalho é reduzir os erros de exatidão de TCs indutivos para medição de energia elétrica, proporcionando maior confiabilidade e satisfação no relacionamento entre as partes envolvidas, fornecedor e consumidor de energia elétrica.

2.1 Princípio de Funcionamento e Erros de Exatidão

O diagrama de circuito de um transformador de corrente ideal conectado a um medidor de energia elétrica é mostrado na figura 2.1. O enrolamento primário é conectado em

série com o condutor por onde flui a corrente primária, que pode estar tanto em um nível de alta tensão como em um nível de baixa tensão, mas em ambos os casos, a princípio, em um nível de corrente incompatível com a capacidade do instrumento destinado a medir tal corrente elétrica. O enrolamento secundário do transformador de corrente é conectado ao sensor de corrente do medidor de energia elétrica. Sendo um determinado TC de corrente primária nominal I_{1n} , quando esta corrente I_{1n} flui no primário do enrolamento do TC, então 5 A circulam no secundário pela ação transformadora do transformador de corrente. Caso circule no primário do transformador de corrente um valor maior do que I_{1n} ou menor do que I_{1n} , então a corrente secundária será um valor para maior ou menor do que 5 A, mas sempre proporcional à relação $\frac{I_{1n}}{5}$. Por analogia o mesmo raciocínio se aplica nos casos em que a corrente secundária nominal do TC seja 1 ou 2 A.

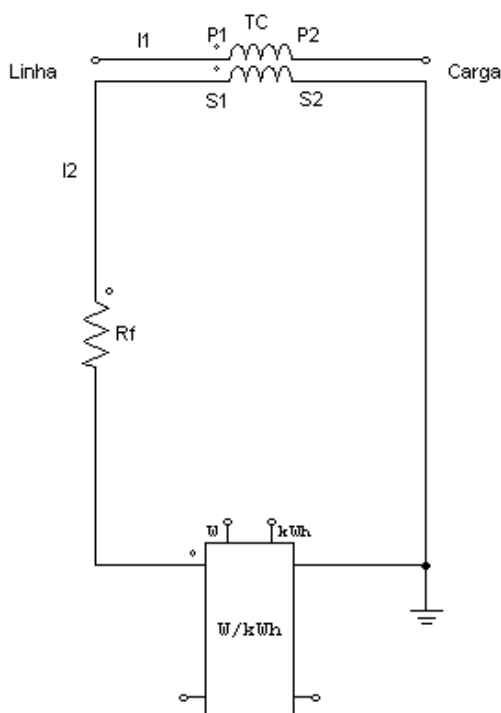


Figura 2. 1 – O Transformador de Corrente Ideal.
Fonte: Elaboração própria.

A corrente secundária circula no sensor de corrente do medidor de energia elétrica. Uma vez que não há conexão direta entre os enrolamentos primário e secundário, o TC estará isolando o medidor do nível de tensão primária (quando o nível de tensão primária

for diferente do nível de isolamento do instrumento de medição de corrente) e do nível de corrente primária. Um dos lados do circuito secundário é conectado à terra para proporcionar proteção contra falhas de isolação. Não se deve conectar os dois lados secundários do TC à terra, porque desta forma estaria sendo criado um caminho alternativo para a corrente secundária do TC – a própria terra conectando os dois terminais secundários -, e o sensor de corrente do elemento de medição não estaria sendo sensibilizado com a real corrente secundária a ser medida, e sim com um valor menor e talvez até mesmo próximo a zero em função da relação entre as impedâncias dos caminhos para a corrente, que fluirá pelo caminho de menor impedância, falseando o resultado da medição.

Os valores normalizados das correntes primárias nominais de TCs conforme a NBR ABNT 6856:2015 são preferencialmente 10 A; 15 A; 20 A; 25 A; 30 A; 40 A; 50 A; 60 A; 75 A. Outras relações nominais também podem ser utilizadas tais como as apresentadas na tabela 2.1 a qual contempla as correntes secundárias nominais de 1 e 5 A. Também são utilizados TCs com múltiplas relações com propósitos de versatilidade em função da necessidade de aumento ou redução futura de cargas.

Tabela 2. 1
Relações Nominais Simples de Transformadores de Corrente.

Corrente primária nominal (A)	Relação nominal In – 5A	Relação nominal In – 1A	Corrente primária nominal (A)	Relação nominal In – 5A	Relação nominal In – 1A	Corrente primária nominal (A)	Relação nominal In – 5A	Relação nominal In – 1A
5	1:1	5:1	100	20:1	100:1	1200	240:1	1200:1
10	2:1	10:1	150	30:1	150:1	1500	300:1	1500:1
15	3:1	15:1	200	40:1	200:1	2000	400:1	2000:1
20	4:1	20:1	250	50:1	250:1	2500	500:1	2500:1
25	5:1	25:1	300	60:1	300:1	3000	600:1	3000:1
30	6:1	30:1	400	80:1	400:1	4000	800:1	4000:1
40	8:1	40:1	500	100:1	500:1	5000	1000:1	5000:1
50	10:1	50:1	600	120:1	600:1	6000	1200:1	6000:1
60	12:1	60:1	800	160:1	800:1	8000	1600:1	8000:1
75	15:1	75:1	1000	200:1	1000:1	10000	2000:1	10000:1

Fonte: ABNT NBR 6856:2015

Os dois terminais no medidor de energia elétrica na figura 2.1 que não estão indicados por nomenclatura no circuito são os terminais de potencial, destinados a receber sinal de tensão de transformadores de potencial, aqui não representados por não serem objeto da pesquisa.

Ainda na figura 2.1 as marcas de polaridade (*) são usadas para mostrar o sentido instantâneo do fluxo de corrente nos enrolamentos primário (no enrolamento primário a marca de polaridade significa corrente entrando na bobina) e secundário (no enrolamento secundário a marca de polaridade significa corrente saindo da bobina) do TC e é função do sentido do enrolamento das bobinas, porque o fluxo percorre o núcleo em sentidos opostos em relação às bobinas primária e secundária. Tais marcas significam que quando a corrente primária I_1 está entrando no terminal primário P_1 , a corrente secundária I_2 está no mesmo instante saindo do terminal secundário S_1 . Estas marcas destinam-se a que os secundários dos transformadores de corrente, quando utilizados para medir potência ou energia elétrica, sejam conectados ao medidor com suas relações de sentido fasorial corretas, ou seja, os sentidos dos fasores corrente estejam corretamente associados aos sentidos dos fasores tensão, porque em caso contrário o medidor estaria computando energia negativa para determinado elemento de tensão x corrente (cada par de sensor de tensão e sensor de corrente no medidor de energia elétrica é chamado elemento, sendo que um medidor trifásico tem três elementos). Cada TC serve a apenas um elemento, sendo necessário mais de um TC, um para cada fase nos casos de medição a três elementos, sendo certo que nos casos de medição a dois elementos, ainda que para três fases utilizam-se apenas dois transformadores de corrente, em função da solução clássica do teorema de *Blondel* - método dos dois wattímetros.

A impedância do elemento sensor de corrente do medidor e a resistência dos fios desde os terminais secundários do TC até o medidor causam uma queda de tensão – ainda que pequena, mas considerável do ponto de vista de influência nos erros de exatidão – no circuito secundário do TC quando da existência de corrente primária e também de corrente secundária. O transformador de corrente deve suprir esta tensão e assim manter a corrente secundária demandada pela carga ôhmica secundária. A impedância do medidor e a resistência dos fios do circuito secundário são então uma carga para o enrolamento secundário do TC.

A impedância do sensor de corrente do medidor é muito baixa, aproximadamente $0,6 \Omega$. A relação nominal de um transformador de corrente é a relação de transformação primário-secundário indicada na sua placa de dados. A relação de espiras de um TC é a relação do número de espiras no enrolamento secundário dividido pelo número de espiras no enrolamento primário. Um transformador de corrente que reduz a corrente, tem mais espiras no seu secundário do que no seu primário. A relação verdadeira de um transforma-

dor de corrente é a relação da corrente primária para a corrente secundária, sob específicas condições de funcionamento, quais sejam o nível de corrente no primário associado ao valor de carga imposta ao secundário.

Em um transformador de corrente ideal, a relação nominal registrada na placa do TC, a relação de espiras e a relação verdadeira seriam sempre iguais, e a corrente secundária reversa sempre estaria em fase com a corrente primária. Mas este transformador ideal não existe. Transformadores de corrente modernos, quando estão suprindo cargas que não excedem a carga referenciada à sua faixa de exatidão admissível, aproximam-se de um TC ideal. No transformador de corrente ideal a corrente secundária é rigorosamente proporcional à relação de espiras e está em fase com a corrente primária. No TC real, uma proporcionalidade exata e relação de fase idêntica entre a corrente primária e a corrente secundária não são possíveis porque uma parcela da corrente primária é utilizada para excitar o núcleo e como consequência a corrente secundária não corresponde à corrente primária na proporcionalidade exata da relação de espiras nem na correspondência exata do ângulo de fase. Isto resulta na existência dos erros de relação e de fase quando comparando com a performance do TC ideal.

A figura 2.2 e a figura 2.3 correspondem respectivamente ao esquema de um TC (sem a representação do ramo de magnetização) e ao diagrama fasorial de um transformador de corrente. O diagrama fasorial – figura 2.3 - é desenhado para um TC de relação 1:1, hipoteticamente como se a relação $k_n = \frac{N_2}{N_1}$ fosse unitária, para possibilitar uma visualização didática. Os fasores das quedas de tensão têm sido desenhados fora de escala, de forma exagerada, para que possam se destacar e serem claramente identificados no diagrama.

A operação de um TC pode ser melhor explicada por meio do diagrama fasorial – figura 2.3 e considerando os elementos passivos na figura 3.1 do circuito equivalente do TC - como segue:

O fluxo ϕ no núcleo induz uma tensão V_2 no enrolamento secundário atrasado do fluxo ϕ de 90° . A tensão V_2 , após as quedas de tensão intrínsecas em R_2 e X_2 dá origem à tensão U_2 nos terminais secundários do TC. A corrente secundária I_2 é determinada pela tensão U_2 nos terminais secundários e pela impedância do circuito secundário Z_{fb} , onde $Z_{fb} = (R_f + R_b) + j X_{Lb}$. I_2 é igual a $\frac{U_2}{Z_{fb}}$ e defasa de U_2 pelo ângulo θ_2 onde $\cos\theta_2$ é o fator de potência da carga secundária do TC (este fator de potência não deve ser confundido com o fator de potência da carga sendo suprida pelo circuito primário).

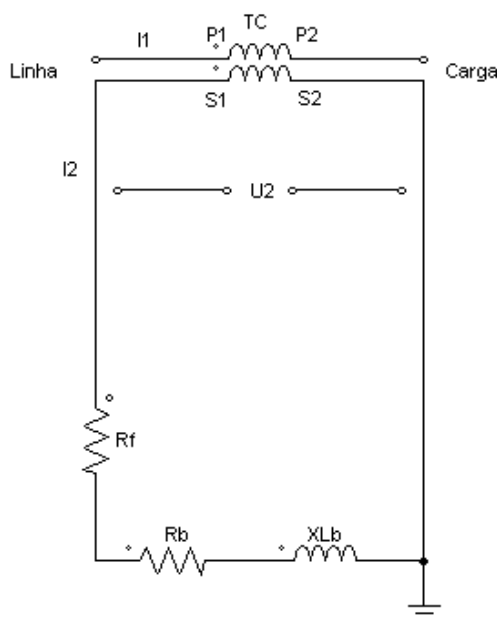


Figura 2. 2 – O Transformador de Corrente Real com Carga.
Fonte: Elaboração própria.

A impedância do circuito secundário Z_{fb} compõe-se da resistência do sensor de corrente R_b somada à resistência da cablagem secundária R_f e à reatância do sensor de corrente X_{Lb} conforme a figura 2.2. Tendo em vista que a impedância do sensor de corrente $R_b + j X_{Lb}$ conectada ao secundário do TC é muito baixa, usualmente menos do que 1Ω , a resistência R_f da cablagem, que conecta os terminais secundários do TC aos terminais do sensor de corrente, é uma considerável parte da carga secundária e não pode ser desprezada no circuito instalado em campo. Em experimento laboratorial a resistência R_f pode ser desprezada porque a cabeção entre os terminais secundários do TC e o medidor de energia elétrica será muito pequena. Em muitos casos de campo a resistência R_f constitui a maior parte da impedância do circuito secundário Z_{fb} .

A queda de tensão no próprio enrolamento secundário N_2 é igual a $I_2 Z_2$ onde Z_2 é a impedância $R_2 + jX_2$ deste enrolamento secundário, sendo R_2 a resistência do enrolamento secundário e X_2 é a reatância de fluxo disperso associado com as trajetórias de ar, dentro e em torno dos condutores do enrolamento secundário. Com relação ao enrolamento primário que é uma fonte de corrente, sua resistência e sua reatância de dispersão não são significativas conforme destacado em Slemon(1974).

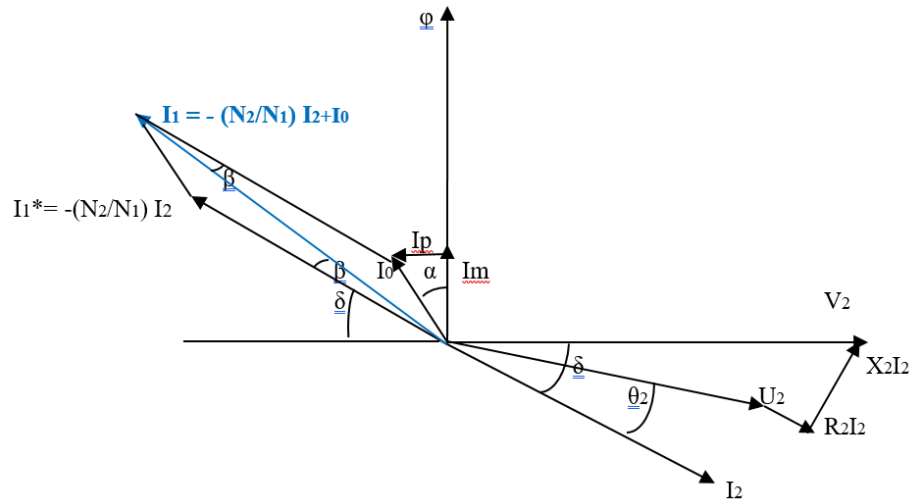


Figura 2. 3 – Diagrama Fasorial do Transformador de Corrente.
 Fonte: Elaboração própria.

A queda de tensão $R_2 I_2$ está em fase com I_2 e a queda de tensão $X_2 I_2$ adianta 90° de I_2 . A tensão induzida no enrolamento secundário V_2 menos a queda de tensão $I_2 Z_2$ no próprio enrolamento secundário, é igual à tensão U_2 nos terminais secundários do TC.

I_m é a corrente de magnetização requerida para fornecer o fluxo φ e com ele está em fase. I_p é a corrente consumida na histerese e nas perdas por correntes parasitas no núcleo, e adianta de I_m por 90° . A soma fasorial de $I_m + I_p$ é corrente de excitação I_0 .

A corrente secundária refletida no primário é $I_1^* = -k_n I_2$, onde $k_n = \frac{N_2}{N_1}$. A corrente primária total é assim a soma fasorial de I_0 com $-k_n I_2$. Como consequência, a corrente I_2 refletida no secundário é menor do que a corrente que realmente deveria surgir no secundário, porque está subtraída da corrente de excitação, e como consequência sempre reflete um valor menor em módulo do que a corrente que circula no primário e também uma defasagem em ângulo, provocada pelo ângulo da corrente de excitação. Os fabricantes contornam o problema da diferença em módulo acrescentando uma fração de espira no primário - já que $I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$ - para compensar de forma fixa este problema, mas não conseguem contornar plenamente porque o percentual de influência da corrente de excitação varia com o valor da corrente primária a cada instante, de forma que em alguns momentos a corrente secundária irá refletir até mesmo um valor maior em módulo do que a corrente primária, por excesso de compensação da fração de espira imposta no processo de fabricação. Com relação à compensação do ângulo, trata-se de uma tarefa bem mais árdua de contornar.

Uma impedância Z_2 no circuito secundário pode ser substituída por uma impedância equivalente Z_1^* no circuito primário, desde que se faça conforme Garcia (2009):

$$Z_1^* = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot Z_2 \quad (2.1)$$

Sendo assim, com uma baixa impedância de carga conectada ao enrolamento secundário, a impedância do enrolamento primário é extremamente baixa, já que a impedância refletida do secundário para o primário é proporcional ao quadrado da relação de espiras, e o enrolamento primário de um transformador abaixador tem muito menos espiras do que o secundário. Com um exemplo simples, podemos verificar: Seja um TC de relação 100 - 5 A, ou seja, de relação nominal 20:1. Uma impedância no secundário será refletida no primário multiplicando-a por um fator de escala de $\left(\frac{1}{20}\right)^2 = 0,0025$. Se a impedância no secundário for da ordem de $0,5 \Omega$, a mesma impedância no primário aparecerá como $0,00125 \Omega$. Uma abordagem analítica diferenciada que ratifica esta mesma ideia de um valor desprezível da impedância do primário de um TC encontramos em Slemmon[49], onde é afirmado que como o primário é uma fonte de corrente, sua resistência e sua reatância de dispersão não são significativas.

A corrente primária do transformador de corrente é determinada pela carga do circuito primário da instalação. A queda de tensão no enrolamento primário é assim muito pequena, ainda que com corrente total na linha primária, por causa da baixa impedância deste enrolamento. A tensão secundária induzida V_2 e a tensão nos bornes secundários U_2 são ambas pequenas, mas não são nulas, porque apesar de pequena a impedância da carga secundária existe; e por essas tensões não serem nulas a tensão que vai fornecer corrente para a carga secundária do TC tem origem em energia que vem da corrente primária, logo, a corrente primária não é completamente refletida em corrente secundária proporcional, e esta é uma das causas do surgimento dos erros de exatidão além da energia intrinsicamente consumida no circuito magnético do TC.

O fasor I_1^* é obtido revertendo o fasor corrente secundária I_2 devidamente multiplicado pela relação de espiras $k_n = \frac{N_2}{N_1}$. Na figura 2.3, na qual o transformador tem uma relação de 1:1, o módulo de I_2 multiplicado pelo fator k_n tem a mesma dimensão do módulo de I_2 antes da operação de multiplicação porque k_n naquela figura, foi imposto ser igual a 1 (um) para facilitar a visualização dos erros na transdução da corrente. Esta reversão é

automaticamente feita se as marcas de polaridade são obedecidas na ligação dos instrumentos ao secundário do TC.

Ainda na figura 2.3 nota-se que o fasor corrente I_1^* não é igual em módulo ao fasor corrente I_1 e que I_1^* está fora de fase com I_1 pelo ângulo β . Em um transformador de corrente ideal de relação 1:1, a corrente I_1^* seria igual em módulo e em fase com I_1 . No transformador de corrente real $I_1 \neq I_1^*$ e esta diferença representa os erros de relação e de ângulo de fase.

A relação verdadeira de um TC é a relação da corrente primária eficaz pela corrente secundária eficaz para o ponto de operação específico ao qual o TC esteja submetido, conforme item 3.1.29 da ABNT NBR 6856:2015 vide ANEXO. O ponto de operação específico é o valor da corrente primária que esteja sendo imposta ao transformador de corrente, associado ao valor da carga que esteja sendo imposta ao secundário do TC.

No diagrama de fasores - figura 2.3 - a relação verdadeira é $\frac{I_1}{I_2}$. Esta relação verdadeira não corresponde exatamente à relação de espiras $\frac{N_2}{N_1}$ relativa ao diagrama fasorial em que foi baseado, visto que I_2 diverge em módulo de I_1 , ainda que a relação de espiras seja 1:1, porque parte da corrente primária I_1 é requerida para suprir a corrente de excitação I_0 .

A relação de espiras $\frac{N_2}{N_1}$ é definida no momento em que o equipamento está sendo fabricado, e é a relação nominal. Esta relação nominal é fixa para um dado transformador de corrente fabricado. Porém a relação verdadeira de um transformador de corrente não é um valor único fixo porque depende do ponto operacional ao qual o TC esteja sendo submetido. Estas condições são a carga secundária, a corrente primária, a frequência e a forma de onda. Conforme o *Edison Electric Institute-EEI(2002)* sob condições normais a frequência e a forma de onda são praticamente constantes, de forma que a relação verdadeira é predominantemente dependente da carga secundária, da corrente primária, e das características construtivas de cada transformador.

A relação verdadeira de um TC não pode ser marcada nos dados de placa porque não é um valor constante e sim varia com os pontos de operação. A relação verdadeira é determinada por testes para condições específicas de uso do TC. Como exemplo, se para um transformador de corrente com dados de placa 80:1 tiver sido encontrado sob teste de condições específicas uma relação de 79,768: 1 tem-se as seguintes considerações a fazer: o valor 79,768 pode ser decomposto em dois fatores e escrito $80 \times 0,9971$. Observa-se que 80 é a relação nominal do TC a qual é, neste caso, multiplicada pelo fator 0,9971. Este

fator, pelo qual a relação nominal de placa do TC é multiplicada para que se obtenha a relação verdadeira é chamado fator de correção de relação FCR, sendo formulado por $FCR =$

$$\frac{\text{Relação verdadeira}}{\text{Relação nominal de placa}}$$

Com relação ao ângulo de fase a corrente secundária reversa não está em fase com a corrente primária circulando no TC. O ângulo β entre esses fasores é conhecido como ângulo de fase do TC ou erro de ângulo do transformador de corrente e é usualmente expresso em minutos de arco (60 minutos de arco é igual a 1°). No transformador de corrente ideal a corrente secundária I_2 estaria exatamente 180° fora de fase com a corrente primária I_1 . As marcas de polaridade automaticamente – desde que corretamente seguidas no processo de ligação do equipamento - corrigem este sentido fasorial invertido. A corrente secundária reversa $I_1^* = -k_n I_2$, nesta hipótese de TC ideal, estaria em fase com a corrente primária e o ângulo de fase seria zero. Porém no transformador de corrente real o ângulo de fase β representa um deslocamento de fase entre o primário e o secundário adicionalmente aos 180° já mencionados. Enquanto estes 180° são corrigidos pelas marcas de polaridade, o ângulo β permanece e não é corrigido. Isto causa erros na medição quando se está medindo energia ou potência elétrica. O ângulo β é positivo quando a corrente saindo do terminal secundário identificado adianta da corrente que está entrando no terminal primário identificado.

O ângulo de fase β não é um valor fixo, mas varia com a carga, com a corrente primária, com a frequência e com forma de onda em diferentes graus. O valor do ângulo de fase β depende da componente de corrente primária requerida para fornecer a corrente de excitação I_0 . Conforme o *Edison Electric Institute*(2002) sob condições normais nas quais a frequência e a forma de onda são praticamente constantes, o ângulo de fase depende apenas da carga secundária, da corrente primária e das características construtivas do transformador de corrente.

Um aumento da carga secundária - a qual para um TC significa um aumento da impedância secundária Z_{fb} - requer um aumento na tensão secundária V_2 , aumento este que demandará um acréscimo no fluxo ϕ no núcleo. Para fornecer um fluxo maior, a corrente de magnetização I_m deve aumentar e a corrente de perdas no núcleo I_p também aumenta. Isto resulta em um aumento na corrente de excitação I_0 . Desta forma conclui-se que aumentar a carga secundária do TC provoca um aumento na corrente de excitação. E já que a corrente de excitação é a causa maior dos erros de relação e de ângulo de fase, estes erros

são afetados por qualquer acréscimo na carga secundária, ou seja, mais instrumentos de medição no secundário do TC, significam mais erros de exatidão.

Transformadores de corrente operam em uma faixa de corrente variável, desde zero até a corrente máxima admissível. O fluxo ϕ no núcleo varia na medida em que a corrente primária do TC varia. Isto significa que com uma carga secundária constante o fluxo ϕ no núcleo deve variar sobre uma faixa variável na medida em que a corrente primária I_1 flutua nesta faixa variável. Se o fluxo ϕ variasse na exata proporção que a corrente de excitação I_0 então as mudanças na corrente primária não afetariam a relação e o ângulo de fase β , em função da proporcionalidade linear que existiria entre o fluxo e a corrente de excitação, ou seja, a representatividade da corrente de excitação em relação à corrente primária seria sempre a mesma e como consequência o percentual de erro manter-se-ia o mesmo. Mas a relação é não linear e esta não linearidade se acentua para baixas correntes primárias.

A figura 2.4. mostra o comportamento da corrente de excitação (fluxo) *versus* a corrente primária para o núcleo magnético de um transformador de corrente; é observado que quando a corrente primária é 10% da corrente nominal a corrente I_0 é 3% da corrente primária real (linha tracejada) ao mesmo tempo em que é 1% da corrente primária nominal (linha contínua); quando a corrente primária real cresce no sentido do valor nominal do TC a representatividade percentual de I_0 em relação à corrente primária real (curva tracejada) vai diminuindo, do que se conclui que existe menos influência da corrente de excitação nas correntes primárias mais próximas da corrente nominal e portanto menos erro de exatidão.

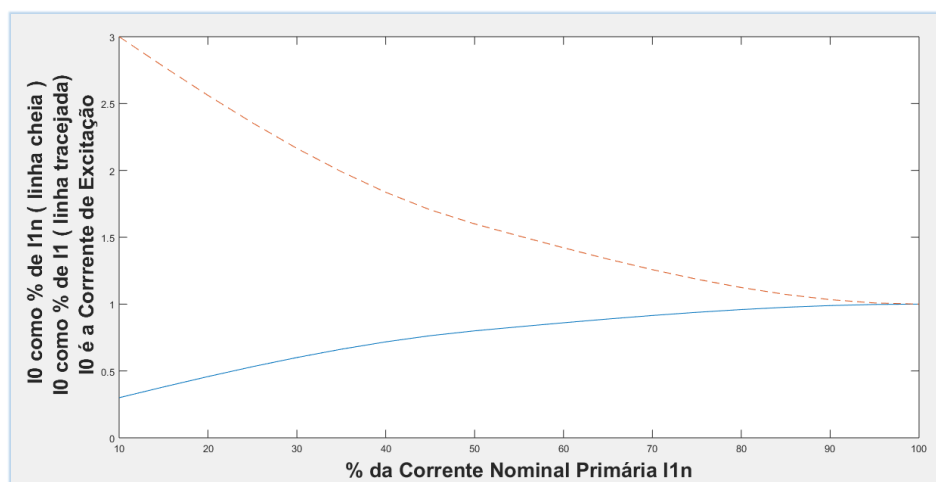


Figura 2. 4 – Curva da corrente de excitação *versus* corrente primária de um TC.

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 2.2. apresenta valores padrão de correntes utilizados para a construção do gráfico de característica $I_1 \times I_0$ mostrado na figura 2.4. Este é o motivo pelo qual admite-se a nível normativo NBR 6856:2015 que os erros de exatidão possam ser maiores para correntes primárias menores, conforme os paralelogramos de exatidão, figura 2.5, figura 2.6 e figura 2.7. Em tais paralelogramos observam-se as classes de exatidão 0,3; 0,6; e 1,2; além de 0,3S e 0,6S. Em um TC com classe de exatidão 0,3 admite-se um erro de $\pm 0,3$ para corrente primária nominal, e admite-se um erro de $\pm 0,6$ para correntes iguais a 10% da corrente nominal. Em um TC com classe de exatidão 0,6 admite-se um erro de $\pm 0,6$ para corrente primária nominal, e admite-se um erro de $\pm 1,2$ para correntes iguais a 10% da corrente nominal.

Tabela 2.2
Corrente Primária *versus* Corrente de Excitação.

Corrente primária I_1 (A)	Corrente de excitação I_0 (A)	I_0 como percentual de I_1 (%)
100	1	1
50	0,8	1,6
10	0,3	3

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a mudança da corrente de excitação não é uma função linear da corrente primária e tendo em vista que a corrente de excitação não muda na exata proporção linear da corrente primária a relação verdadeira e o ângulo de fase variam com a corrente primária. Os erros de relação e de fase são usualmente maiores entre 0% e 10% de I_1 do que em valores maiores do que 10% de I_1 porque naquela faixa de pequenas correntes primárias, as correntes de excitação são percentualmente muito mais representativas, e uma maior quantidade percentual de corrente de excitação acarreta maiores erros tanto de relação como de ângulo. Em função disto a norma ABNT NBR 6856/2015 permite que na determinação da classe de exatidão de um TC este apresente erros maiores quando ensaiados com 10% da corrente nominal do que quando ensaiado com 100% da corrente nominal. Esta característica é comumente representada graficamente por paralelogramos de exatidão, uma representação gráfica clássica das faixas limite de exatidão de transformadores de corrente conforme figura 2.5, figura 2.6 e figura 2.7.

No plano técnico internacional, a norma IEC 60044-1 *Instrument Transformers Part 1 : current transformers*(2003) define os limites dos erros de módulo de corrente de

acordo com a tabela 2.3 e os erros de defasagem angular de acordo com a tabela 2.4 para classes de exatidão estabelecidas nas respectivas tabelas.

Tabela 2. 3
Limites de Erros de Corrente Para TC's de Medição (%)
(classes de 0,1 a 0,5)

Classe de Exatidão	$I_1 / I_{1n} \times 100$ (%)			
	5	20	100	120
0,1	+- 0,4	+- 0,2	+- 0,1	+- 0,1
0,2	+- 0,75	+- 0,35	+- 0,2	+- 0,2
0,5	+- 1,5	+- 0,75	+- 0,5	+- 0,5

Fonte: IEC 60044-1(2003)

Tabela 2. 4
Limites de Defasagem de Ângulo para TC's de Medição (minutos)
(classes de 0,1 a 0,5)

Classe de Exatidão	$I_1 / I_{1n} \times 100$ (%)			
	5	20	100	120
0,1	+- 15	+- 8	+- 5	+- 5
0,2	+- 30	+- 15	+- 10	+- 10
0,5	+- 90	+- 45	+- 30	+- 30

Fonte: IEC 60044-1(2003)

No plano normativo nacional, a norma ABNT NBR 6856/2015 estabelece um modelo gráfico para conceituar limites de exatidão, considerando que um TC de medição está dentro de sua classe de exatidão quando os pontos determinados pelos erros de relação (ϵ_r) e pelos ângulos de fase (β) estiverem dentro dos paralelogramos de exatidão especificados conforme figura 2.5, figura 2.6 e figura 2.7, correspondentes a sua classe de exatidão, sendo que o paralelogramo interno (menor), refere-se a 100% da corrente nominal, e o paralelogramo externo (maior) refere-se a 10% da corrente nominal. No caso de TC com fator térmico (F_t) superior a 1, o paralelogramo interno (menor) refere-se para além dos 100% de corrente nominal, portanto refere-se também à corrente térmica contínua nominal, geralmente 120%, 150% ou 200% da corrente nominal. A norma ABNT NBR 6856/2015 criou uma classe de exatidão especial para serviços de medição, objetivando pontos de intercâmbio de energia onde ocorrem grandes variações de corrente elétrica, com um fator de carga acentuadamente baixo, como é o caso de parques de geração eólica e parques de geração solar, onde a produção de energia é extremamente sazonal ao longo do tempo em função

da intensidade de vento ou de luz solar. Nestes pontos de intercâmbio, existe uma grande probabilidade de o fluxo de energia manter-se por longos períodos com correntes muito pequenas em relação à corrente nominal do TC. Desta forma, para casos especiais nos quais ocorre grande variação nos valores da corrente primária em operação, são mais indicadas para especificação as classes de exatidão 0,3S e 0,6S.

Considera-se que um TC com classe de exatidão 0,3S e 0,6S está em sua faixa aceitável quando o fator de correção de relação FCR e o ângulo de fase β encontram-se dentro do paralelogramo menor para 20% da corrente nominal e corrente térmica contínua nominal, e dentro do paralelogramo maior, para 5% da corrente nominal.

O paralelogramo menor representa o limite de exatidão maior e o paralelogramo maior representa o limite de exatidão menor. O paralelogramo maior é o dobro do paralelogramo menor por convenção normativa, caso fosse o triplo ou o quádruplo, isto implicaria uma maior permissividade a que erros maiores do TC pudessem ser aceitos.

As exatidões dos transformadores de corrente são sempre referenciadas às cargas nominais impostas ao secundário do transformador de corrente de forma que se em uma placa de identificação de um TC consta a informação 12,5 VA 0,3 isto significa que o mesmo atende a uma exatidão de 0,3% quando em seu secundário tem uma carga menor ou igual a 12,5 VA. Nada se garante para cargas maiores impostas a este TC.

Transformadores de corrente são projetados para terem boa precisão dentro da faixa de frequência de 25 a 133 Hz, reproduzindo bem as correntes primárias no secundário. Distorções na forma de onda na corrente primária têm efeitos desprezíveis nos erros de relação e de fase. Até mesmo uma grande quantidade de terceira harmônica no primário é bem reproduzida no seu secundário conforme o *Edison Electric Institute-EEI*(2003).

Os fios que conectam os terminais secundários do TC aos terminais dos instrumentos de medição da corrente, energia ou potência, têm efeito de carga no enrolamento secundário do TC. Em muitos casos nos quais o circuito secundário é longo, os fios constituem a maior porção da carga secundária. Por esse motivo os fios do circuito secundário devem ser incluídos em todos os testes e cálculos como parte da carga secundária.

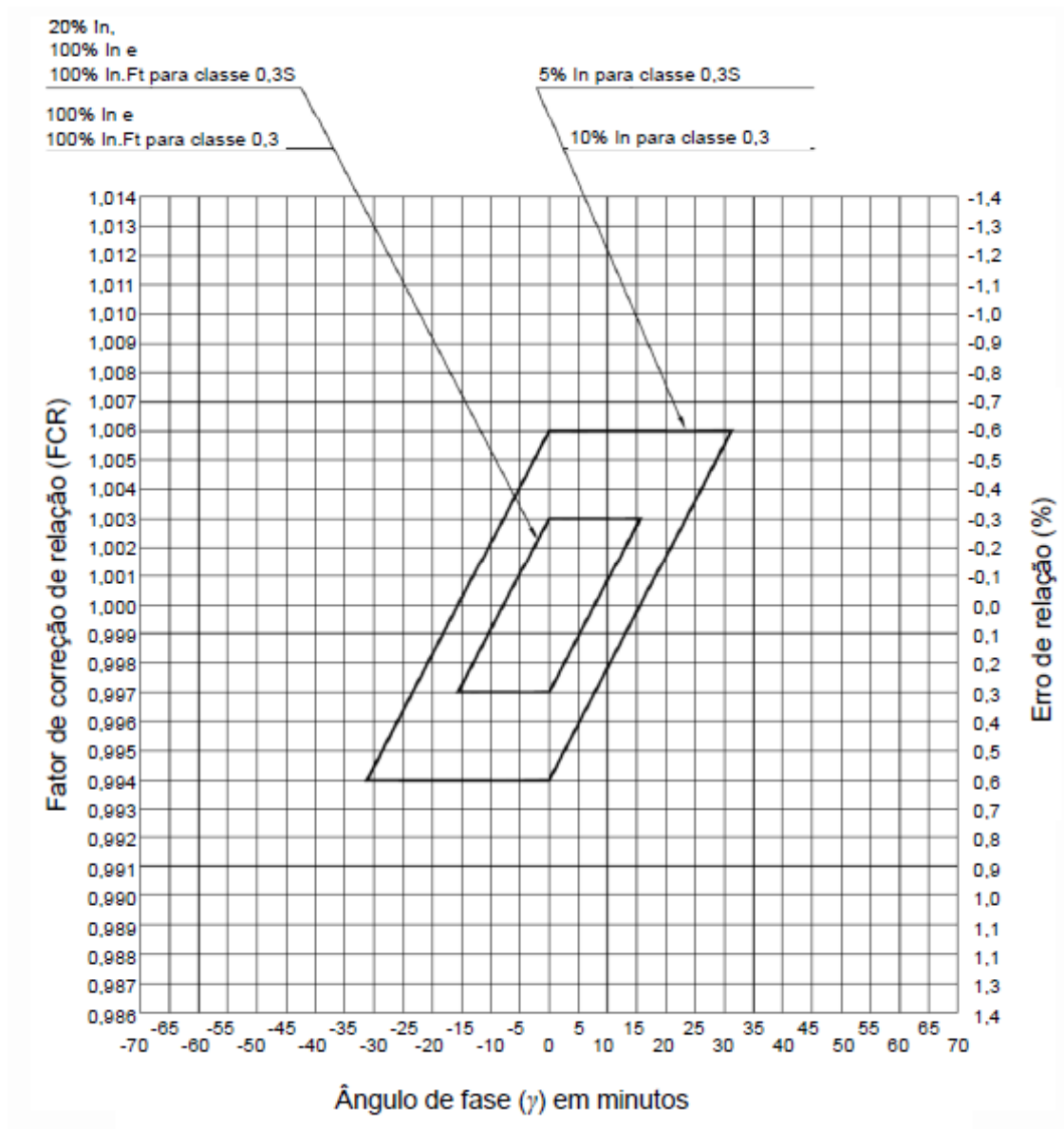


Figura 2. 5 – Paralelogramos de exatidão para classes 0,3 e 0,3S.
Fonte: ABNT NBR 6856/2015.

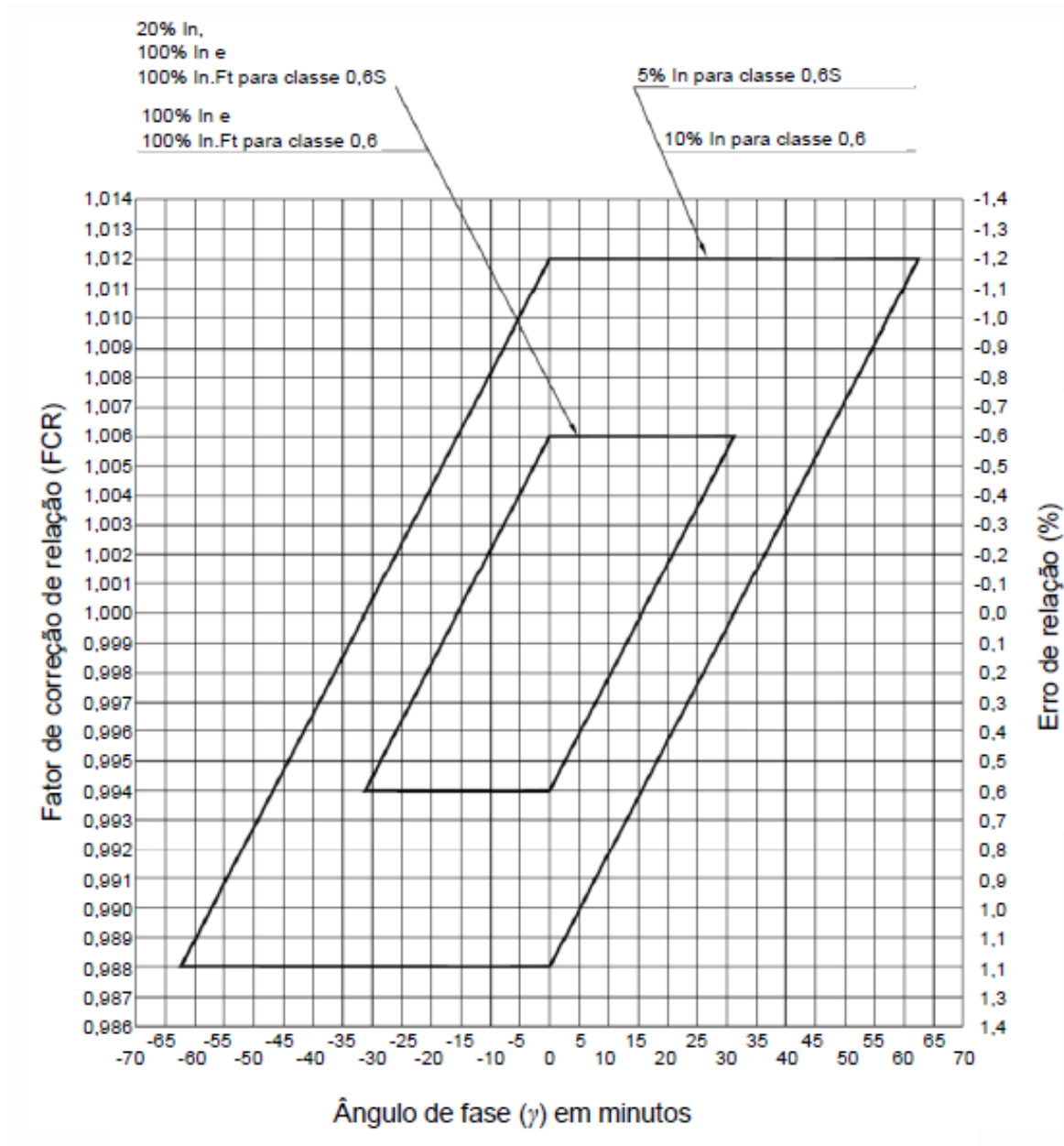


Figura 2. 6 – Paralelogramos de exatidão para classes 0,6 e 0,6S.
Fonte: ABNT NBR 6856/2015.

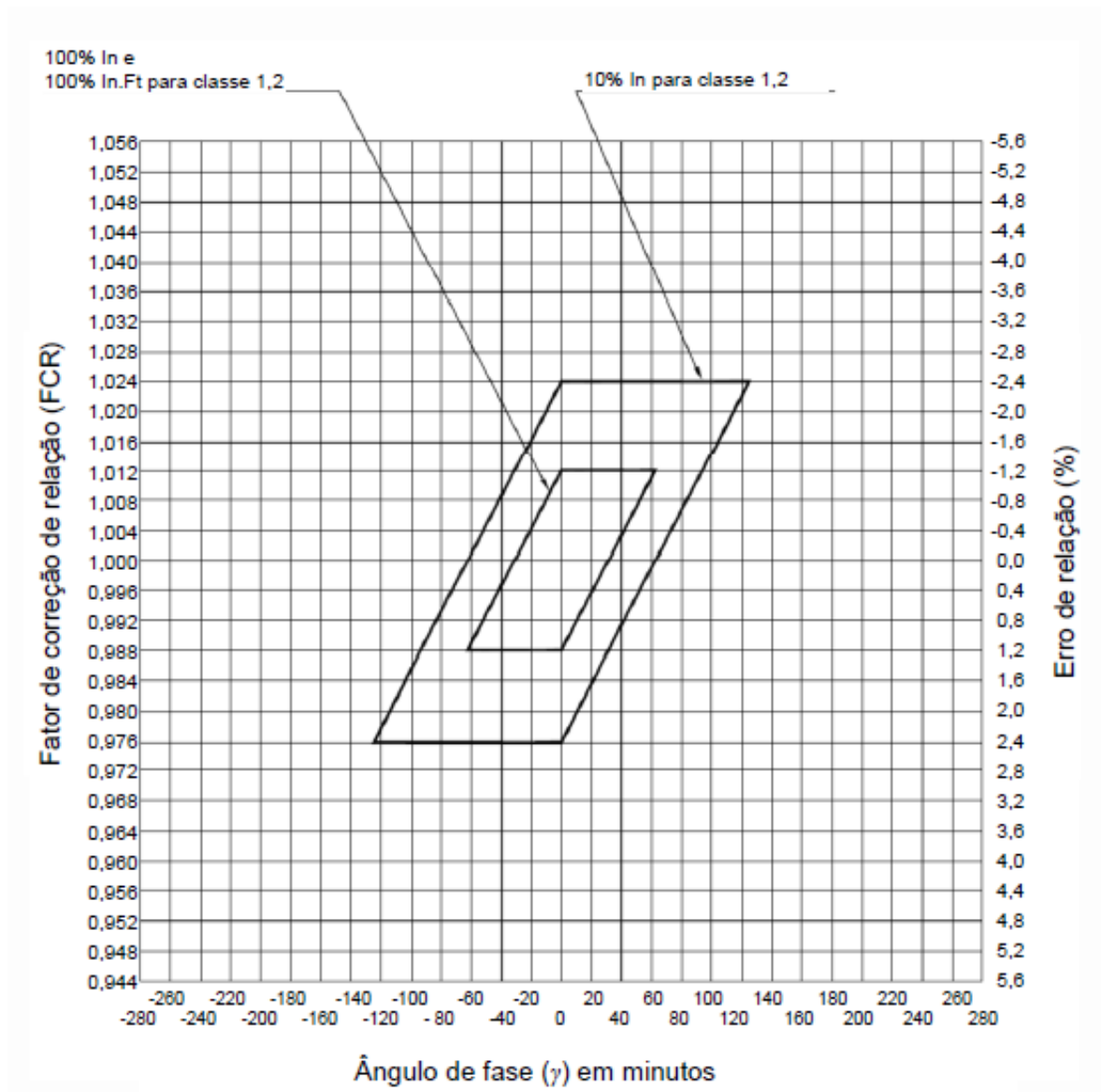


Figura 2. 7 – Paralelogramos de exatidão para classe 1,2.
Fonte: ABNT NBR 6856/2015.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS determina no submódulo 12.2 dos Procedimentos de Rede (2016) que nos projetos de sistemas de medição de fronteira entre agentes do setor elétrico conste um capítulo - Memorial de Cálculo de influência da cablagem secundária de TCs na exatidão de sistemas de medição de energia elétrica - exatamente em função da influência da impedância dos cabos secundários na exatidão dos resultados da medição.

O projeto de um transformador de corrente envolve as mesmas fórmulas e princípios que as utilizadas no projeto de transformadores de força. Um projetista segue essencialmente o mesmo processo: escolha do tamanho e do material a ser utilizado no núcleo, e seleção da bitola do fio e do número de espiras a serem utilizadas na construção das bobinas, e analisa os resultados obtidos para constatar se reúnem os critérios requeridos no projeto, e na sequência fazendo ajustes para alcançar os requisitos solicitados. Por razões econômicas e dimensionais o projetista tenta realizar os resultados desejados com o menor núcleo possível, com mínimo gasto de condutores tanto em bitola como em número de espiras. No projeto de um transformador de força os voltampéres de saída e a elevação de temperatura são a base para a seleção do núcleo; as espiras são calculadas para produzir uma alta densidade de fluxo. No entanto para transformadores de corrente, os voltampéres disponíveis para entrega têm pouca importância; a densidade de fluxo, determinada pela corrente secundária e pela impedância da carga secundária, devem ser mantidas relativamente baixas para minimizar os erros de relação e de ângulo de fase entre as correntes primária e secundária porque quanto maior a densidade de fluxo no núcleo, maiores as intensidades das correntes de Foucault e então maiores as perdas no circuito magnético. Para manter a densidade de fluxo baixa, uma das ideias é aumentar a seção transversal do núcleo o que contradiz os requisitos de projeto de manter o tamanho físico do TC dentro de parâmetros razoáveis. O uso de material no núcleo de alta permeabilidade também mantém as perdas em um nível baixo. O primário geralmente é apenas uma barra ou um condutor passando através de um núcleo aberto, compreendendo apenas uma espira; a relação de corrente então é determinada pelo número de espiras secundárias. A seleção do núcleo consiste em encontrar um núcleo tal que a área de seção transversal seja suficientemente grande para suprir a tensão requerida pela carga secundária com uma densidade de fluxo suficientemente baixa. A resistência da carga secundária é o fator determinante para a tensão que o TC vai fornecer ao secundário, e assim um transformador de corrente nunca deve ficar com seu secundário aberto, porque neste caso toda a corrente de entrada primária irá fornecer corrente de excitação - corrente de magnetização e corrente de perdas no núcleo; a densidade de fluxo nestas circunstâncias é extremamente alta, resultando em uma tensão secundária também extremamente alta, a qual coloca em risco o técnico de medição e o isolamento do enrolamento secundário.

Na manufatura de transformadores de corrente o projetista também enfrenta dificuldades com projetos de baixos ampéres espira pelo motivo a seguir exposto. Os ampéres

espira da corrente de excitação tomam emprestado parcela dos ampéres espira primários e o que é transferido ao enrolamento secundário são os ampéres espira remanescentes. Desta forma nem todos os ampéres que servem à carga do circuito primário vão sensibilizar as espiras do secundário, porque vão alimentar as perdas magnéticas, parasitas e por histerese do circuito magnético do TC. À medida que os ampéres espira totais do primário diminuem de valor, os ampéres espira de excitação tornam-se uma maior percentagem do total de ampéres espira, aumentando os erros, porque os mesmos contêm em sua formulação uma relação entre a corrente de excitação e a corrente primária. Por prática de manufatura, quando os ampéres espira do primário são menores do que 600, torna-se difícil projetar transformadores de corrente com pequenos erros. Tem-se então que usar materiais especiais no núcleo e / ou métodos de compensação que possam reduzir os erros a valores razoáveis. O capítulo 3 a seguir apresenta os métodos de compensação estudados e desenvolvidos no curso da pesquisa.

Capítulo 3

MÉTODOS PROPOSTOS PARA A CORREÇÃO DE ERROS

Esse capítulo desenvolve métodos propostos para correção de erros de exatidão em transformadores de corrente para medição de energia elétrica. Duas ideias foram estudadas: a) uma proposta de algoritmo que compensa os erros a partir de valores de tensão, corrente e fator de potência coletados na memória de massa do medidor de energia elétrica; b) a concepção e implementação de um circuito eletrônico que instalado no secundário do transformador de corrente altera o módulo e o deslocamento de fase da corrente secundária reduzindo os erros de exatidão inerentes aos TCs ferromagnéticos.

A apresentação das ideias (a) e (b) são aqui registradas na ordem inversa em que foram desenvolvidas na prática, em função da discussão teórica de partida estar relacionada diretamente à compreensão do algoritmo. O desenvolvimento do algoritmo surge ao final como uma ideia alternativa e um horizonte a ser explorado e otimizado.

3.1 Metodologia para Compensação dos Erros em TCs através de Algoritmo

Essa seção desenvolve uma metodologia para o cálculo de erros em transformadores de corrente por meio de algoritmo, a partir do conhecimento das características dos TCs e das medições de tensões e correntes envolvidas, fazendo uso de memória de massa coletada em medidor eletrônico de energia elétrica alimentado por TC. Importante destacar, como ponto de partida nesta seção, funções e conceitos relacionados a transformadores de corrente.

As três funções básicas dos transformadores de corrente são:

- a) reduzir a corrente para valores seguros;
- b) isolar o circuito primário do circuito secundário;
- c) permitir o uso de valores normatizados, para fins de padronização.

TCs para serviços de medição destinam-se a fornecer sinal de corrente para amperímetros ou para sensores de corrente em medidores de potência ou de energia elétrica. Operam na faixa entre 0 A e $(I_n \times F_t)$ A; em que I_n é a corrente nominal do TC; F_t é o fator térmico do TC, que é uma constante multiplicadora da corrente nominal que define a suportabilidade do TC em operação permanente, mantendo suas características de operação e exatidão.

Classes de exatidão dos TCs de medição: 0,3; 0,3S; 0,6; 0,6S e 1,2 ; quaisquer delas referenciada à carga em VA possível de ser imposta ao secundário do TC para que este mantenha a exatidão indicada, conforme a ABNT NBR 6856/2015.

TCs para serviços de proteção destinam-se a fornecer sinal de corrente para relés de proteção que por sua vez comandam disjuntores de média e alta tensão via parâmetros de ajuste. Operam na faixa entre $1 \times I_{In}$ A até $20 \times I_{In}$ A.

Exemplos de classes de exatidão de TCs de proteção: 5P, 10P, 15P, 20P e 30P, quaisquer delas referenciada à uma impedância máxima em seu secundário relativa à tensão máxima especificada junto com a exatidão, e.g., a designação 25 VA 5P15 significa que um TC com carga secundária de 25VA atende uma classe de exatidão de 5%, com fator limite de exatidão de 15 vezes a corrente nominal conforme ABNT NBR 6856/2015. A preocupação com saturação, relacionando-a com a exatidão, é inerente aos projetos de TCs de proteção, portanto, processos de compensação de exatidão que se preocupam com a saturação são projetos de compensação de TCs de proteção. Estes TCs não serão estudados nesta pesquisa, porque este estudo tem foco em TCs de medição, notadamente para medição de potência e/ou energia elétrica.

3.1.1 Definições

Correntes secundárias nominais de TCs conforme ABNT NBR 6856:2015:

A corrente secundária nominal deve ser escolhida de acordo com a prática do local onde o transformador for usado. Os valores considerados padrões são 1, 2 e 5 A. Quanto menor a corrente nominal, menor serão as quedas de tensão no secundário do transfor-

mador de corrente, porque uma vez em operação o circuito, a impedância imposta ao secundário do TC será constante.

3.1.1.1. Relação de transformação nominal k_n :

$$k_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.1)$$

3.1.1.2. Relação de transformação real k :

$$k = \frac{I_1}{I_2} \quad (3.2)$$

3.1.1.3. Erro de relação $\varepsilon_r(\%)$:

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{[(k_n - k)]}{\frac{k}{100}} \quad (3.3)$$

3.1.1.4. Erro de ângulo de fase (β):

$$\beta = \arg \widehat{I_1 I_2} \quad (3.4)$$

3.1.1.5. Circuito equivalente de transformador de corrente:

Modelo que prevê o comportamento do transformador de corrente composto de elementos ativos e passivos que representam as relações elétricas e magnéticas do TC. Compõe-se de um circuito elétrico e suas correspondentes equações matemáticas que descrevem a sua operação, evidenciando as variáveis de saída em relação às variáveis de projeto e ambientais. O circuito equivalente do TC é conforme a figura 3.1.

3.1.2 O Modelo do Transformador de Corrente

A figura 3.1 mostra o modelo de um transformador de corrente. R_1 e R_2 representam nesta ordem as perdas no cobre do primário e do secundário; L_1 e L_2 representam nesta ordem as indutâncias de fluxo disperso do primário e do secundário, que são as componentes de indutância em função da imperfeita concatenação magnética entre um enrolamento e outro, que na literatura internacional é conhecida como *leakage impedance*. R_p é a resistência do ramo de magnetização com origem nas correntes parasitas e no fenômeno da histerese; L_m é a indutância do ramo de magnetização com origem nas forças necessárias para orientar os dipolos magnéticos. R_f é a resistência dos cabos que conduzem corrente dos terminais secundários do TC aos bornes do sensor de corrente do medidor de energia elétrica. R_b e L_b compõem a resistência e a indutância, respectivamente, do sensor de corrente do medidor, e sendo a reatância X_{L_b} (correspondente a L_b) desprezível em relação à reatância X_2 (correspondente a L_2) será considerada como impedância do sensor de corrente do medidor apenas a resistência R_b .

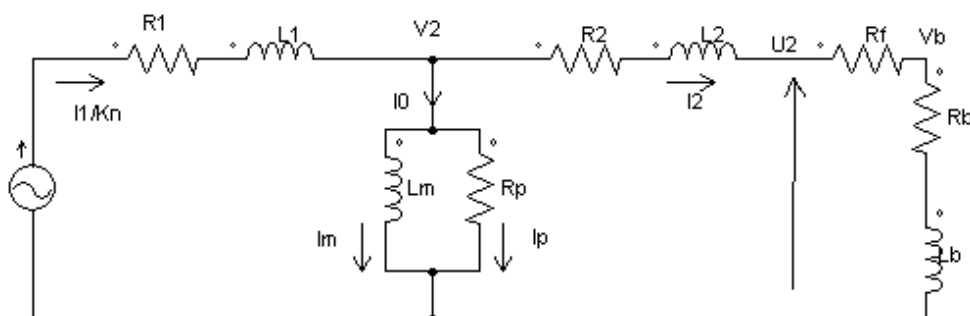


Figura 3. 1 – Circuito equivalente de TC referido ao secundário.

Fonte: Elaboração própria.

As equações que descrevem o comportamento do modelo são apresentadas e estudadas nas seções seguintes, oportunidade em que as consultas à figura 3.1 serão sempre pertinentes.

3.1.3 Influência nos erros em função das impedâncias envolvidas

Na figura 3.1 os componentes R_1 e L_1 não têm influência nas tensões e correntes porque são muito menores do que quaisquer das outras impedâncias envolvidas, como também L_b sendo muito menor do que quaisquer das indutâncias envolvidas, também será desprezada nas considerações matemáticas a seguir.

Denominemos a impedância equivalente do ramo de magnetização de Z_m e sua admitância equivalente de Y_m . Denominemos a impedância total secundária de Z_{2t} , ou seja, $Z_{2t} = Z_2 + Z_{fb}$. Aplicando divisor de corrente no circuito da figura 3.1, temos:

$$I_2 = \frac{Z_m}{Z_m + Z_{2t}} \frac{I_1}{k_n} \quad (3.5)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_{2t}} \frac{1}{k_n} \quad (3.6)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\frac{1}{Y_m}}{\frac{1}{Y_m} + Z_{2t}} \frac{1}{k_n} \quad (3.7)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{1 + Y_m Z_{2t}} \frac{1}{k_n} \quad (3.8)$$

Portanto, a menos da relação de transformação nominal k_n , existe um termo contendo impedâncias/admitâncias que interferem na relação de transferência entre a corrente primária e a corrente secundária. Neste sentido, independente de Y_m , é ideal que Z_{2t} seja o menor possível, para que o multiplicador $\frac{1}{1 + Y_m Z_{2t}}$ aproxime-se de $\frac{1}{1+0}$ não influenciando na relação de transformação.

3.1.4 Influência nos erros em função das correntes envolvidas

Em Medeiros Filho(1980) é apresentada a formulação de erros em TCs tal como equacionados em 3.15 e 3.17, cujas deduções aqui desenvolvemos.

O erro de relação (erro de módulo) em p.u. de um transformador de corrente é:

$$\varepsilon_r = \frac{k_n |I_2| - |I_1|}{I_1} \quad (3.9)$$

Na figura 2.3 o módulo de I_1 é encontrado projetando sobre o vetor I_1 os vetores I_2 e I_0 .

$$|I_1| = k_n |I_2| \cos\beta + |I_0| \cos(90 - \delta - \alpha - \beta) \quad (3.10)$$

O ângulo β é de dimensão muito pequena em relação ao valor dos módulos das correntes envolvidas, e portanto é desprezível diante do erro entre módulos das correntes I_1 e I_2 , de forma que a equação anterior torna-se:

$$|I_1| = k_n |I_2| + |I_0| \cos(90 - \delta - \alpha) \quad (3.11)$$

$$|I_1| = k_n |I_2| + |I_0| \text{sen}(\delta + \alpha) \quad (3.12)$$

$$k_n |I_2| - |I_1| = - |I_0| \text{sen}(\delta + \alpha) \quad (3.13)$$

$$\frac{k_n |I_2| - |I_1|}{|I_1|} = \frac{- |I_0| \text{sen}(\delta + \alpha)}{|I_1|} \quad (3.14)$$

A equação 3.14 representa o erro de relação em p.u. por analogia com a equação 3.9. O sinal negativo informa que *a priori* o erro é negativo em função da corrente de exci-

tação consumida como perdas no ramo de magnetização. Os módulos das correntes I_0 , I_1 e I_2 representam os valores eficazes das correntes, de modo que eliminaremos na expressão abaixo os símbolos modulares e o erro de relação será:

$$\varepsilon_r = \frac{I_0}{I_1} \text{sen}(\delta + \alpha) \quad (3.15)$$

O erro de ângulo (ângulo entre I_1 o inverso de I_2) de um transformador de corrente é calculado a partir da figura 2.3, calculando inicialmente o valor da tangente do ângulo β :

$$\tan\beta = \frac{|I_0| \text{sen}(90 - \delta - \alpha - \beta)}{k_n |I_2| \cos(\beta)} \quad (3.16)$$

Quando o valor de um ângulo é muito pequeno, como é o caso de β , o ângulo e sua tangente se aproximam, o $\cos\beta$ tende a 1 (um) e o próprio β em relação aos ângulos δ e α é desprezado, de forma que a expressão acima torna-se:

$$\beta = \frac{|I_0|}{|I_1|} \cos(\delta + \alpha) \quad (3.17)$$

Considerando que a carga secundária de um TC seja constante, o que é verdade uma vez posto em operação o sistema de medição, os erros de relação e de ângulo conforme as equações 3.15 e 3.17 aumentam quando a corrente primária diminui. É interessante portanto que a corrente que está sendo medida aproxime-se da corrente nominal do TC. Esta é a mesma ideia presente nos instrumentos de bobina móvel analógicos antigos, nos quais buscava-se a região da escala em que o ponteiro se aproximasse do fim de escala, para que fosse obtido resultado com maior exatidão.

3.1.5 Influência nos erros em função da característica B x H do núcleo

As considerações desta seção são direcionadas a examinar a influência das características do ferro do núcleo nos erros de exatidão do transformador de corrente, desenvolvendo formulações que possibilitem compensar os erros em intervalos de integralização da

memória de massa de correntes medidas em TCs. A ideia, para cada intervalo de integralização é identificar as tensões secundárias do TC que correspondam às suas respectivas correntes; a partir destas tensões secundárias calculam-se as densidades de fluxo magnético B_s no ferro, para cada corrente integralizada; conhecidos os B_s de cada intervalo de integralização, mineram-se - na curva característica do ferro fornecida pelo fabricante do TC - os H_s correspondentes ao B_s calculados, matriciando-se na sequência os B_s calculados *versus* os H_s encontrados; utilizam-se o H_s encontrados para calcular as correntes de excitação para cada intervalo de integralização de correntes secundárias; calculam-se os erros em cada intervalo de integralização; calculam-se as correntes corretas para cada intervalo de integralização; calcula-se a energia com as correntes integralizadas corrigidas. Cada cálculo deste descrito é feito para um intervalo de integralização de 1 hora (ou outro segmento de tempo escolhido na coleta da memória de massa por supervisorio) e portanto a energia calculada é a energia consumida em 1 hora, sendo certo que somam-se todas as energias consumidas em intervalos de integralização de 1 hora e encontra-se ao final a energia no período de tempo completo desejado, geralmente 1 mês que corresponde ao ciclo de faturamento, compensada com os erros encontrados referentes ao transformador de corrente.

As equações 3.18 a 3.29 são desenvolvidas para embasamento das formulações utilizadas na solução algorítmica. A equação 3.18 decorre do erro de relação (erro de módulo) em p.u. de um transformador de corrente e é conforme a seguir:

$$\varepsilon_r = \frac{k_n |I_2| - |I_1|}{I_1} = \frac{|I_2| - \frac{|I_1|}{k_n}}{\frac{|I_1|}{k_n}} = - \frac{|I_0|}{\frac{|I_1|}{k_n}} = - \frac{I_p \cos(\delta) + I_m \sin(\delta)}{\frac{|I_1|}{k_n}} \quad (3.18)$$

A dedução de 3.18 é consequência de análise trigonométrica da figura 2.3, onde:

$$\begin{aligned} \text{a projeção de } I_p \text{ sobre } I_2 \text{ é} & \quad - I_p \cos(\delta) \\ \text{a projeção de } I_m \text{ sobre } I_2 \text{ é} & \quad - I_m \cos(90 - \delta) = - I_m \sin(\delta) \end{aligned}$$

Interessante esclarecer que projetamos I_p sobre I_2 e I_m sobre I_2 porque o objetivo é comparar o $|I_0|$ com $\frac{|I_1|}{k_n}$, sendo que $\frac{|I_1|}{k_n}$ é justamente o que deveria ser o $|I_2|$. Mas não é

em função do erro, e assim formulando, a equação 3.18 representa o erro de exatidão absoluto.

Outra alternativa é calcular o erro de exatidão absoluto do transformador de corrente através da relação entre a corrente de excitação e o somatório da corrente secundária com a corrente de excitação, conforme a equação 3.19:

$$\varepsilon_r = \frac{-|I_0|}{|I_2| + |I_0|} \quad (3.19)$$

Os caminhos possíveis para calcular o I_0 antes de utilizar a equação 3.19 são:

- a) a partir da curva B x H do ferro do núcleo;
- b) a partir da curva de magnetização $V_{\text{secundário}} \times I_{\text{excitação}}$ fornecida pelo fabricante.

O erro de ângulo de um transformador de corrente conforme equação 3.4 é:

$$\beta = \arg \widehat{I_1 I_2}$$

O modelo de um transformador de corrente - conforme a figura 3.1 - permite inferir que a força eletromotriz induzida no secundário de um TC é:

$$U_2 = Z_{fb} \cdot I_2 \quad (3.20)$$

$$Z_{fb} = (R_f + R_b) + jX_{lb} = Z_{fb} \angle \theta_2 \quad (3.21)$$

O *burden* do TC é característica de fabricação - significa a carga máxima em VA que pode ser submetida ao secundário do transformador de corrente sem que haja redução na exatidão garantida pelo fabricante - e é especificado em potência aparente e fator de potência correspondente, relativos à corrente nominal de 5 A.

Conhecidas as características do TC, quais sejam: a impedância Z_{fb} do circuito secundário do TC, a área líquida A da seção transversal do núcleo, o número de espiras N_2 do enrolamento secundário, a frequência f do sinal de corrente e a corrente medida secundária I_2 do TC, a indução magnética (ou densidade de fluxo magnético) B no núcleo do

TC é equacionada para o valor da corrente secundária circulando no TC em cada intervalo de integralização, conforme a equação 3.23 decorrente da equação 3.22:

$$B = \frac{U_2}{4,44 \cdot A \cdot f \cdot N_2} \quad (3.22)$$

$$B = \frac{Z_{fb}}{4,44 \cdot A \cdot f \cdot N_2} \cdot I_2 \quad (3.23)$$

O material ferromagnético do núcleo do transformador de corrente possui características de intensidade de campo magnético $H \left(\frac{A \cdot e}{m} \right)$ versus densidade de fluxo magnético B_m (tesla), com perfil similar à figura 3.2, onde H_0 é a intensidade de campo magnético em função da corrente de excitação, H_p é a intensidade de campo magnético em função da corrente de perdas por histerese e por correntes de Foucault e H_m é a intensidade de campo magnético em função da corrente de magnetização necessária para orientação dos dipolos magnéticos.

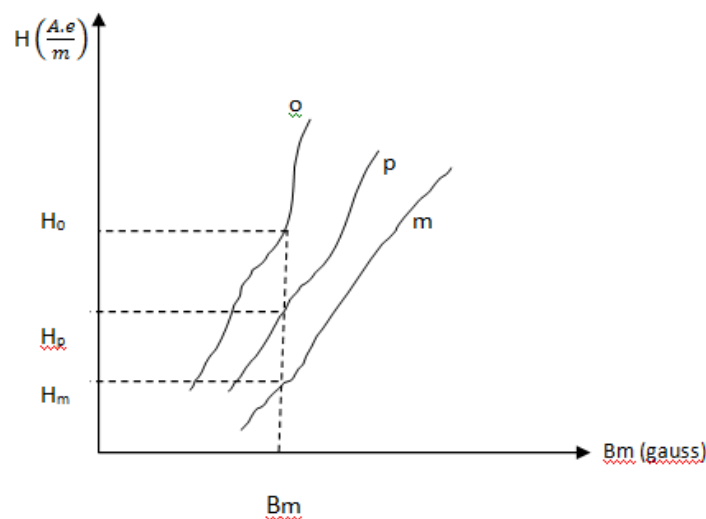


Figura 3.2. – Característica $H \times B_m$ do núcleo de ferro de um TC.

Fonte: Elaboração própria.

Conhecidos os valores dos Bs por cálculo para cada intervalo de integralização de correntes secundárias, associa-se na curva característica H x B_m os Hs correspondentes aos Bs calculados a partir da equação 3.23, identificando H₀, H_p e H_m para cada B calculado. Calculam-se as correspondentes correntes I₀, I_p e I_m conforme as equações 3.24 a 3.26, onde l é o comprimento médio do núcleo do TC e N₂ é o número de espiras da bobina secundária do TC:

$$I_0 = H_0 \frac{l}{N_2} \quad (3.24)$$

$$I_p = H_p \frac{l}{N_2} \quad (3.25)$$

$$I_m = H_m \frac{l}{N_2} \quad (3.26)$$

Os erros de relação percentual, consequentes das equações 3.18 e 3.19 e o erro de ângulo de fase entre a corrente primária e a corrente secundária - invertida 180° pela correta ligação dos terminais primários e secundários dos TCs, seguindo as marcas de polaridade – estão expressos nas equações 3.27, 3.28 e 3.29:

$$\epsilon_r(\%) = - \frac{I_p \cos \delta + I_m \sin \delta}{\frac{I_1}{k_n}} \cdot 100 \quad (3.27)$$

ou

$$\epsilon_r(\%) = - \frac{I_0}{\frac{I_1}{k_n}} \cdot 100 \quad (3.28)$$

e

$$\beta \cong \frac{I_m \cos \delta - I_p \sin \delta}{\frac{I_1}{k_n}} \quad (3.29)$$

Demonstra-se a equação 3.29, a partir da figura 2.3, prolongando-se I_1^* no segundo quadrante, traçando uma paralela ao eixo x passando no ponto extremo do vetor I_1^* , observando-se que o ângulo entre o prolongamento de I_1^* e a paralela mencionada é δ , calculando o cateto oposto do triângulo retângulo formado por I_1 e o prolongamento de I_1^* , como a soma das projeções de $-I_p \sin \delta + I_m \sin(90 - \delta) = -I_p \sin \delta + I_m \cos \delta$; este cateto oposto dividido pelo cateto adjacente que é I_1 associado com a constante de relação nominal do TC, é exatamente a tangente de β . Mas para ângulos muito pequenos decorre da trigonometria que o ângulo e sua tangente se aproximam, logo β - erro de ângulo - é a própria tangente do ângulo.

Na indisponibilidade da característica $H \times B_m$ para as correntes de perdas e de magnetização (figura 3.2), pode ser utilizada a equação 3.28 ao invés da equação 3.27, e que de fato foi o procedimento adotado na parte prática desta pesquisa para a compensação algorítmica, visto que os fabricantes não disponibilizaram as características extratificadas nas componentes vetoriais da corrente de excitação.

3.1.6 Proposta de algoritmo para compensação dos erros em TCs

Conforme o desenvolvimento teórico na subseção 3.1.5 anterior a partir da corrente secundária medida e de características físicas do TC é identificada a densidade de campo magnético - equação 3.23. Associando a densidade de fluxo magnético medida na curva característica do ferro identifica-se a intensidade de campo magnético correspondente. Conhecendo a intensidade de campo magnético para a corrente secundária medida, calcula-se a corrente de excitação I_0 , a partir da qual calculam-se o erro de exatidão e o erro de ângulo. Aplicando este procedimento para segmentos de tempo integralizados na memória de massa de correntes secundárias, são identificados os erros de exatidão para cada intervalo de integralização. Um algoritmo pode então ser construído para computar as correntes secundárias corrigidas em seus erros e consequentemente computar a energia consumida em cada intervalo de integralização corrigida, e na sequência calcular a energia consumida corrigida no período completo da memória de massa coletada. É esta a ideia desenvolvida nesta seção.

A corrente primária de um transformador de corrente está constantemente variando em função da demanda de carga da unidade consumidora. A corrente secundária I_2 segue proporcionalmente a variação da corrente primária I_1 em uma unidade consumidora de energia elétrica, compondo uma curva de memória de massa de corrente elétrica, que pode ser integralizada em intervalos de 5, 10, 15, 30 ou 60 minutos, conforme selecionado em aplicativo supervisorio a partir dos dados de memória de massa coletados em medidor eletrônico de energia elétrica.

Os algoritmos desenvolvidos nesta pesquisa integralizam intervalos de 60 minutos, porque a conversão da demanda em 60 minutos e a respectiva energia consumida nos mesmos 60 minutos não requer nenhuma constante de conversão de demanda para energia uma vez que uma demanda constante durante 1 hora é igual à energia consumida em 1 hora.

Como suporte de partida para análise, observa-se na tabela 3.1 uma amostra de intervalos de memória de massa das variáveis tensão, corrente e fator de potência de uma carga que consome energia elétrica durante 1 dia em intervalos de integralização horária (60 minutos), portanto são 24 registros de tensão, corrente e fator de potência. Cada intervalo de integralização compõe um bloco de informações de variáveis das quais se pode calcular a energia consumida no intervalo selecionado, obtida a partir dos valores de tensão, corrente e fator de potência.

O somatório das energias computadas nos 24 intervalos de integralização horários compõe a energia consumida pelo cliente no período de 1 dia. Nos casos em que o intervalo de integralização é de 1 hora, a energia consumida no intervalo é idêntica à potência integralizada. Nos casos em que o intervalo de integralização é inferior a 1 hora, a energia consumida no intervalo é a multiplicação da potência integralizada pelo intervalo em fração de hora, por exemplo, se o intervalo é de 15 minutos o multiplicador será 0,25 e se o intervalo é de 30 minutos o multiplicador será 0,50.

Tabela 3.1
Memória de Massa de Tensões, Correntes e Fator de Potência para Algoritmo Teste_Tese_1

Intervalo horário	I ₂ TC (A)	V _{2fn} (V)	cosφ
1º	5	220	0.90
2º	1	221	0.90
3º	3	220	0.90
4º	3	219	0.90
5º	3	219	0.90
6º	3	218	0.90
7º	4	219	0.95
8º	4	220	0.95
9º	4	217	0.95
10º	4	217	0.95
11º	4	217	0.95
12º	4	218	0.95
13º	3	219	0.80
14º	3	219	0.80
15º	3	220	0.80
16º	3	220	0.80
17º	3	219	0.80
18º	3	218	0.80
19º	2	217	0.80
20º	2	216	0.80
21º	2	216	0.80
22º	2	217	0.80
23º	2	218	0.80
24º	2	218	0.80

Fonte: Elaboração própria.

O procedimento sugerido é conforme a seguir:

- coleta-se a memória de massa de corrente I_2 , tensão V_{2fn} e $\cos\phi$ no medidor de energia elétrica conectado ao TC do qual se quer compensar o erro, estabelecendo-se a matriz de memória de massa de correntes, tensões e fatores de potência;
- calcula-se a matriz de memória de massa da indução magnética ou densidade de campo magnético B ;
- faz-se um procedimento de busca matricial, correlacionando-se as matrizes B e H , com base na tabela 3.2.
- calcula-se matricialmente os valores de I_0 correspondentes aos seus H_0 ;
- calculam-se os erros de relação para cada intervalo de integralização, matriciando os erros;

- f) compensam-se os erros das correntes para cada intervalo de integralização e compõe-se a nova curva de memória de massa da energia elétrica consumida, com as correntes já corrigidas, obtendo-se pelo somatório das energias consumidas em cada intervalo de integralização o valor da energia medida com os erros corrigidos.

A relação $B \times H$ característica do ferro do núcleo do TC relaciona a densidade de campo magnético com a intensidade de campo magnético e uma vez conhecida é utilizada para identificar as intensidades de campo magnético correspondentes às densidades de campo magnético calculadas a partir da memória de massa. A tabela 3.2 é um exemplo correlacionado à memória de massa da tabela 3.1.

Tabela 3.2
Densidade de Campo Magnético *versus* Intensidade de Campo Magnético

Densidade de campo magnético B_m (Wb/m ²)	Intensidade de campo magnético H (Ae/m)
1	2
2	3
3	4
4	5
5	6
6	7
7	8
8	9
9	10
10	11
11	12
12	13
13	14
14	15
15	16
16	17
17	18
18	19
19	20
20	21
21	22
22	23
23	24
24	25

Fonte: Elaboração própria.

O fluxograma para o algoritmo proposto encontra-se no apêndice A.1 e o script do algoritmo implementado com o resultado de energia compensada encontra-se no apêndice A.2, algoritmo TESTE_TESE_1.

3.2 Metodologia para Compensação dos Erros em TCs

Esta seção estuda uma metodologia para compensação dos erros em transformadores de corrente. A análise de TCs para medição de energia elétrica requer o conhecimento da modelagem, e através desta, o estudo das grandezas que influenciam o processo, possibilitando o ajuste dos componentes que demandam energia no circuito, para alinhar o comportamento da resposta do processo aos efeitos desejados. O processo de transdução da corrente primária para a corrente secundária em TCs é modelado com as impedâncias referidas ao lado secundário, fazendo uso da relação de transferência de impedâncias entre enrolamentos de transformadores conforme a equação $Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2^*$.

Optamos por referir o modelo ao secundário porque as impedâncias características próprias do TC que têm parcela de influência na relação entre a corrente primária e a corrente secundária encontram-se no secundário e assim não há necessidade de operações de transferência de impedâncias de um lado para o outro dos enrolamentos, simplificando os cálculos.

3.2.1 Indutância do fluxo não concatenado (fluxo disperso)

Indutância do fluxo não concatenado também conhecida como indutância de fluxo disperso é uma componente indutiva em um transformador que resulta da imperfeita concatenação magnética entre os enrolamentos. Qualquer fluxo magnético que não enlaça ao mesmo tempo os enrolamentos primário e secundário atuam como uma impedância indutiva em série com o primário e essa impedância do fluxo não concatenado é mostrada em um diagrama esquemático como uma indutância adicional. Esta indutância do fluxo não concatenado referida ao primário acarreta uma impedância do fluxo não concatenado referida ao circuito secundário na proporção da relação de espiras do secundário para as espiras do primário ao quadrado - $Z_2^* = Z_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$ - no processo de modelagem do TC, agravando os

erros do transformador de corrente porque $N_2 \gg N_1$ e como consequência tal impedância de fluxo não concatenado é uma carga secundária que influenciará nos erros do TC.

Enquanto em um transformador ideal não existe fluxo não concatenado, em um transformador real parte do fluxo não enlaça o enrolamento secundário. Este fluxo não concatenado que não percorre o caminho magnético do TC e permanece disperso em outros caminhos, não toma parte na ação transformadora e é representado como uma impedância adicional em série com o enrolamento primário, que uma vez referido ao secundário, é representado como L_2 na figura 3.1.

3.2.2 A solução proposta para a compensação

A origem dos erros de exatidão do TC, seja o erro de relação, seja o erro de ângulo de fase, é a corrente de excitação I_0 . Uma fração I_0 da corrente primária I_1 é requerida para magnetizar o núcleo do transformador e realizar o acoplamento magnético entre os circuitos primário e secundário, como observado em Baccigalupi e Liccardo(2007); um transformador de corrente ideal reduz a corrente primária pela relação $k_n = \frac{N_2}{N_1}$, ou seja, o número de espiras do secundário N_2 dividido pelo número de espiras do primário N_1 . Mas em função das perdas no núcleo e da necessária tensão a ser fornecida às impedâncias conectadas ao secundário do TC, a multiplicação da corrente secundária I_2 pelo fator k_n será diferente da real corrente fluindo no barramento primário do TC, como se pode observar pela diferença entre I_1 e I_1^* na figura 2.3 da seção 2.1.

A equação 3.30 representa a distorção que ocorre na relação $\frac{N_2}{N_1}$ a qual uma vez utilizada conduz a uma corrente primária diferente da real, onde percebe-se a influência da corrente I_0 , ocasionando erro na relação e erro no ângulo conforme análise do diagrama fasorial na figura 2.3.

$$\frac{I_1^* + I_0}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.30)$$

Para que os erros não existissem seria necessário, conforme figura 2.3, que $I_1 = I_1^*$, e nesta circunstância o numerador na equação 3.30 seria a própria corrente I_1 , mitigando os erros do TC. Tendo em vista que a corrente de excitação é a responsável pelo fornecimento das quedas de tensão nos parâmetros longitudinais do TC (R_2 e X_2), na fiação se-

cundária (R_f) e no sensor de corrente do medidor de energia elétrica (R_b), a nossa proposta é o fornecimento externo desta tensão por um circuito de controle que produza continuamente esta tensão de compensação, minimizando a corrente de excitação I_0 .

Os elementos característicos de projeto L_m , R_2 e L_2 do transformador de corrente, necessitam ser conhecidos para a implantação desta solução. Apresentamos na tabela 3.3 valores destes elementos para um transformador de corrente de relação 250-5 A, nível de isolamento 0,6 kV, ao qual conectamos o circuito de controle projetado para compensação dos erros de exatidão, cujos L_m e L_2 foram fornecidos pelo fabricante do TC, enquanto R_2 foi medido em laboratório com um microohmímetro de resistência de contato. Este transformador de corrente foi utilizado nos testes com protótipo cujos resultados são apresentados no capítulo 4.

Tabela 3.3
Parâmetros do Transformador de Corrente

TC (A)	Isolamento (kV)	Indutância de magnetização L_m (H)	Resistência do secundário R_2 (m Ω)	Indutância dispersa do secundário L_2 (mH)
250-5	0,6	1,5	41,5	15,75

Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Quedas de tensão nos circuitos secundários de TCs

A figura 3.1 na subseção 3.1.2 permite inferir que as quedas de tensão no circuito secundário são função dos parâmetros longitudinais: a) indutância de fluxo não concatenado L_2 ; b) resistência de perdas no cobre secundário R_2 ; c) resistência da fiação do circuito secundário R_f ; d) resistência do sensor de corrente do medidor de energia elétrica R_b ; e com base nas referências Baccigalupi e Liccardo (2007)(2009), Slomovitz(2000)(2003) e Locci e Muscas(2000), podemos formular as quedas de tensão no circuito secundário de TCs, conforme 3.34, desenvolvida a partir de 3.31, 3.32 e 3.33.

$$V_b + (R_f + R_2)I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad (3.31)$$

$$I_2 = \frac{V_b}{R_b} \quad (3.32)$$

$$V_b + \frac{(R_f + R_2) V_b}{R_b} + L_2 \frac{d\left(\frac{V_b}{R_b}\right)}{dt} \quad (3.33)$$

$$V_b \left(1 + \frac{R_f + R_2}{R_b}\right) + \frac{L_2}{R_b} \frac{dV_b}{dt} \quad (3.34)$$

A queda de tensão ao longo do circuito secundário é apresentada em 3.34 e é função das quedas de tensão em R_f , R_2 , R_b e L_2 . Este somatório de quedas de tensão pode ser produzido e utilizado para redução dos erros do TC, mitigando o fornecimento original pelo transformador de corrente, através de uma compensação ativa, baseado na construção de circuito de controle com amplificadores operacionais e componentes passivos.

A subseção 3.2.4 justifica a utilização de circuitos de controle analógicos com amplificadores operacionais - AO para inibição da produção de tensão secundária pelo circuito magnético do transformador de corrente, direcionando o suprimento da corrente de excitação para a alimentação do circuito de compensação com AO e não para a parcela da corrente primária do TC antes responsável pela excitação.

Dessa forma, um circuito eletrônico nesta pesquisa concebido, mede em tempo real a tensão no elemento sensor de corrente do medidor de energia elétrica, e utiliza-se desta tensão para produzir uma tensão idêntica à que o ramo de magnetização do TC está produzindo. A atuação do circuito de compensação ocorre em tempo real com tensões diferentes sendo produzidas em intervalos de integralização diferentes em função da variação do comportamento das correntes em sua memória de massa. Tendo em vista a produção desta tensão ser por fonte externa, a energia necessária para alimentar a carga secundária do TC não terá mais origem na corrente de excitação, e sim, na corrente que será suprida pelo circuito eletrônico. A corrente de excitação do TC será portanto mitigada a valores que tendem a zero, e a diferença entre I_1 e I_1^* tenderá a zero, e como consequência, os erros de exatidão do TC também tendem a zero.

3.2.4 Eletrônica analógica *versus* eletrônica digital

O circuito de controle concebido em uma das soluções para o problema tratado nesta pesquisa é analógico. Esta seção tem o objetivo de esclarecer a pertinência da utilização da tecnologia analógica e não da tecnologia digital na solução sugerida. Durante as últimas décadas muito tem sido profetizado que a eletrônica digital estaria tornando obsoleta a eletrônica analógica em pouco tempo. Esta profecia não se concretizou nem se concretizará. Ambas tecnologias, analógica e digital, conviverão continuamente cada uma atendendo seu nicho de aplicação.

Conforme Seabra(2000) a eletrônica digital é uma especialista em trabalhar com números. Esta é a principal razão pela qual vemos mais e mais situações onde a eletrônica digital torna-se elemento fundamental. A função da eletrônica analógica é diferente. Seu papel fundamental é produzir um sinal elétrico cujo comportamento seja análogo ao de uma grandeza não elétrica, como também conversão de sinais elétricos correlacionados tais como tensão em corrente ou corrente em tensão. É com o auxílio da eletrônica analógica que o som da voz pode ser captado em um microfone e transformado em sinal elétrico. Também é através da eletrônica analógica que a temperatura de uma fornalha pode ser medida e transformada em um sinal elétrico para que possa ser controlada. Além disso, a eletrônica analógica processa as informações de uma maneira quase instantânea se comparada à eletrônica digital. Isso quer dizer que ela é muito mais rápida. Desta forma a eletrônica analógica é a ponte de ida e volta entre o mundo real e o mundo da eletrônica digital. Logo, em soluções digitais encontram-se necessariamente embarcados circuitos analógicos sempre que um interfaceamento com o mundo real seja necessário, notadamente no processo de sensoriamento, o que é imperativo na maioria dos sistemas de controle. Em muitas aplicações onde velocidade de processamento e resposta são fundamentais, a eletrônica analógica é empregada ao invés da eletrônica digital. Em Williams(1991) encontra-se uma leitura indispensável aos que tenham interesse neste debate, com artigos de diversos autores - que tratam exatamente deste tema - e remetemos à sua leitura aqueles que imaginam que a eletrônica analógica seria solução do passado.

Ainda em Seabra(2000) constata-se que a eletrônica digital se mostra mais eficiente em computação do que a eletrônica analógica para uma série de situações, porém em aplicações em ambientes agressivos ou de alta velocidade, como ambientes industriais, emprega-se computação analógica.

Em baixas frequências, que é o caso da utilização de transformadores de corrente na frequência industrial de 60 Hz, a eletrônica analógica trabalha satisfatoriamente. A solução aqui concebida para o controle foi simples e operacional, focada em poucos amplificadores operacionais, com a simples função de coleta do sinal, e seu tratamento em tempo real sobre uma equação diferencial, sua transdução e realimentação ao circuito secundário do transformador de corrente. A inserção de eletrônica digital neste contexto viria ampliar desnecessariamente o circuito, requerendo conversor analógico-digital, processamento digital e posteriormente a conversão digital-analógica para a realimentação no circuito secundário do TC, o qual está no mundo analógico.

Neste trabalho os blocos de interesse para a solução utilizados foram: a) amplificador inversor; b) amplificador somador inversor; c) amplificador diferenciador; d) amplificador de transresistência, também conhecido como conversor corrente-tensão. Em Franco(2002), Seabra(2000), Gruiter(1988) e Júnior(2003) encontra-se farto material sobre o tema com as deduções das funcionalidades de transferência dos quatro blocos de interesse.

3.2.5 Análise da solução de controle por diagramas de Bode

Uma dimensão para a análise teórica da solução é através de diagramas de Bode, os quais apresentam a resposta em módulo e em ângulo da função de transferência de um sistema em função da frequência do sinal operando no sistema.

Um compensador (também conhecido como controlador) tem o objetivo de compensar características indesejáveis do sistema original. Neste sentido, o objetivo do sistema de controle nesta pesquisa é que a diferença entre a tensão no ramo de magnetização do transformador de corrente V_2 e a tensão produzida pelo sistema de controle V_C seja muito pequena. Ou seja, V_C tem que se aproximar de V_2 porque V_C será injetada no secundário do TC para mitigar V_2 , e mitigando V_2 reduzir ao mínimo a corrente de excitação. Alcança-se este objetivo na medida em que a função de transferência entre V_C e V_2 tenha módulo unitário e fase zero.

A análise dos sinais de tensão V_2 no ramo de magnetização do transformador de corrente, V_b no elemento sensor de corrente *-burden-* do medidor de energia elétrica, e V_c produzida pelo sistema de controle compensatório, é aqui realizada com o auxílio do método de Bode, sob a ótica da resposta em frequência, objetivando uma prévia teórico-

analítica para conseguir aproximar, na frequência de interesse, o módulo unitário e o ângulo nulo na transferência do sinal de queda de tensão entre V_2 e V_b .

A função de transferência ideal entre a tensão de magnetização V_2 e a tensão no elemento sensor de corrente V_b para o sistema compensado é a que possua módulo de transferência unitário e ângulo de transferência nulo. Nesta condição, V_c mitiga V_2 , a corrente de excitação I_0 do TC tende a zero e I_2 tende a I_1 em módulo e em ângulo.

A lei de *Kirchoff* aplicada ao modelo do TC (vide figura 3.1 na subseção 3.1.2) é equacionada como :

$$V_2 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_f I_2 + R_b I_2 \quad (3.35)$$

Mas $I_2 = \frac{V_b}{R_b}$, e L_b para medidores eletrônicos é desprezível em relação a L_2 de forma que a dinâmica do processo será:

$$\frac{L_2}{R_b} \frac{dV_b}{dt} + \left(1 + \frac{R_f + R_2}{R_b}\right) V_b = V_2 \quad (3.36)$$

A função de transferência de tensões do secundário do TC ao elemento sensor de corrente no modo tensão é $\frac{V_b(s)}{V_2(s)}$, e as quedas de tensão em R_2 , X_2 e R_f causam uma atenuação em módulo e uma defasagem em ângulo.

O sistema de elementos passivos do secundário compensado tem a função de transferência no modo tensão como $\frac{V_c(s)}{V_2(s)}$ e o sinal de saída tende a seguir o sinal de entrada.

A dinâmica do processo de transferência de tensões entre elementos do secundário do TC é definida pela equação diferencial em (3.37) e é uma dinâmica de primeira ordem.

Definindo $T_d = \frac{L_2}{R_b}$, $\frac{d}{dt} = s$ e $R_{eq} = 1 + \frac{R_f + R_2}{R_b}$, a resposta em frequência no domínio de Laplace é conforme as equações:

$$T_d s V_b + R_{eq} V_b = V_2 \quad (3.37)$$

$$V_b = \frac{1}{R_{eq} + s T_d} V_2 \quad (3.38)$$

$$G_p = \frac{1}{R_{eq} + s T_d} \quad (3.39)$$

A equação 3.39 representa a função de transferência de tensões entre a tensão induzida no secundário do TC e a tensão que chega no sensor de corrente do medidor de energia elétrica.

O circuito apresentado na figura 3.3 reproduz a equação 3.36 produzindo uma tensão de compensação V_C similar à tensão de magnetização V_2 desde que as seguintes condições sejam satisfeitas:

$$R_3 C_1 = \frac{L_2}{R_b} \quad (3.40)$$

$$\frac{R_4}{R_5} = 1 + \frac{R_f + R_2}{R_b} \quad (3.41)$$

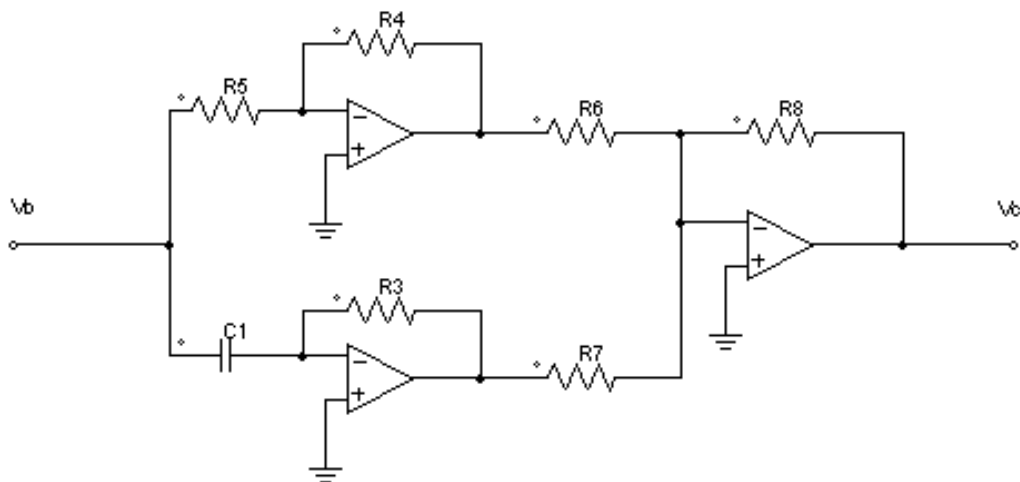


Figura 3.3 – Estágio de circuito de controle com derivativo teórico.
Fonte: Elaboração própria.

Em Astrom e Wintenmark(1997) observa-se que um derivativo puro como o apresentado na figura 3.3 não pode e nem deve ser implementado porque surgirá uma grande

amplificação de ruídos, os quais se apresentam em alta frequência. Então é sugerido aproximar a função de transferência do ramo derivativo por

$$sT_d \approx \frac{sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \quad (3.42)$$

Ainda conforme Astrom e Wintenmark(1997) a função de transferência na direita da equação 3.42 aproxima a derivada bem em baixas frequências mas limita o ganho em altas frequências, sugerindo utilizar N na faixa entre 3-20.

Aproximar a função de transferência conforme a equação 3.42 significa implementar um polo. Para esta implementação incrementamos o resistor R_9 conforme a figura 3.4, o qual altera a função de transferência do derivador de $-R_3C_1s$ para $-R_3C_1 \frac{s \frac{1}{R_9C_1}}{s + \frac{1}{R_9C_1}}$, e desta forma limitamos o ganho na parte derivativa em altas frequências através do acréscimo deste polo. Neste trabalho utilizamos $N=10$ e desta forma $R_3 = 10 R_9$.

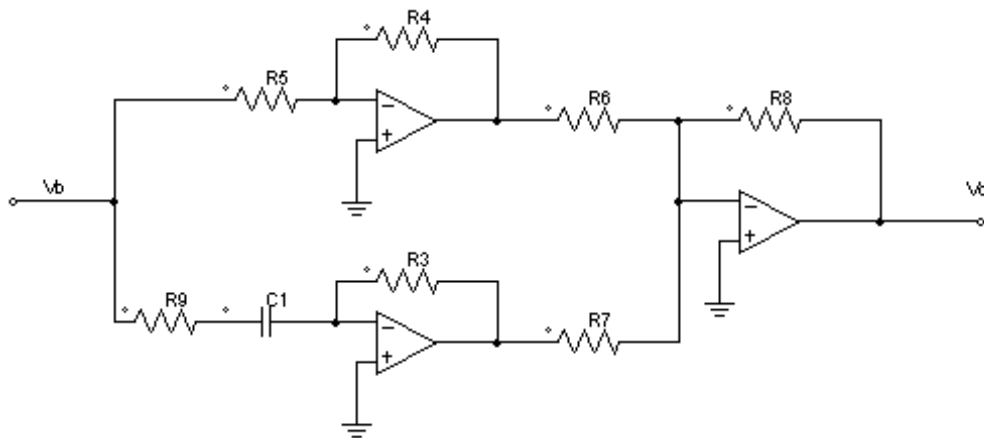


Figura 3.4 – Estágio de circuito de controle com derivativo prático.

Fonte: Elaboração própria.

A função de transferência genérica das tensões entre elementos secundários do transformador de corrente é:

$$G_p(s) = \frac{\left(\frac{1}{R_{eq}}\right) k}{1 + s \left(\frac{T_d}{R_{eq}}\right)} \quad (3.43)$$

sendo:

k : ganho do processo;

$T = \frac{T_d}{R_{eq}}$: período crítico.

O diagrama de Bode genérico do TC sem compensação é conforme a figura 3.5. A ideia do método é conceber um circuito de controle que compense em módulo e em ângulo o fasor tensão gerado pelo ramo de magnetização do transformador de corrente, de forma que o diagrama de Bode do circuito secundário do TC compensado apresente módulo unitário e ângulo zero, ou valores próximos a estes na frequência de interesse de 60 Hz ou 377 rad/seg.

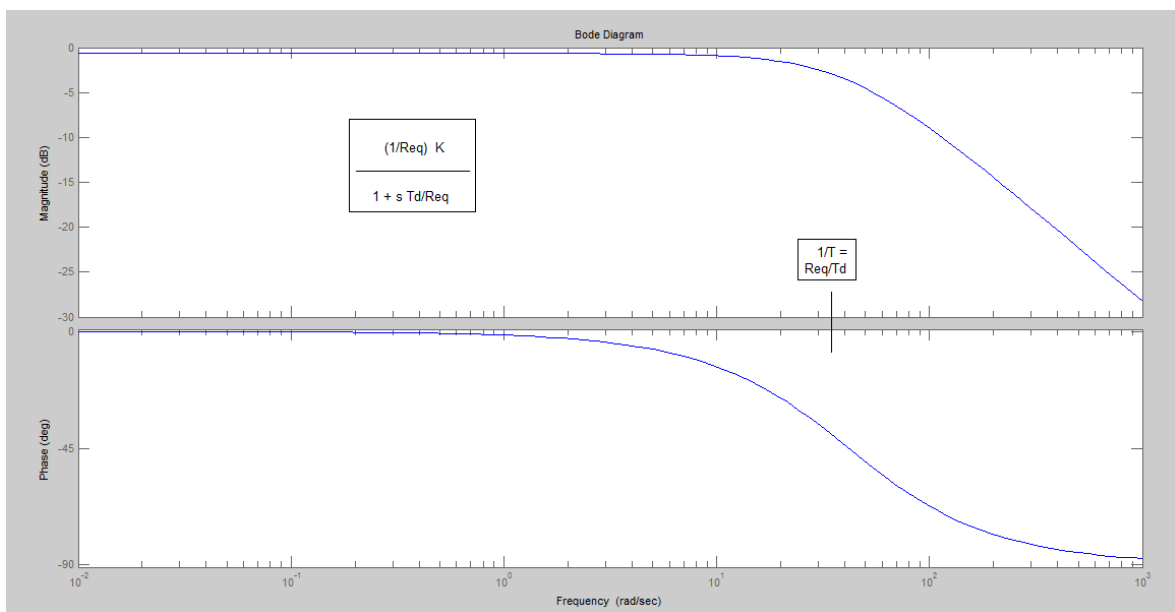


Figura 3.5 – Diagrama de Bode genérico da função de transferência das tensões do circuito secundário do TC sem compensação.

Fonte: Elaboração própria.

A tensão de compensação V_C gerada pelo controle é então aplicada ao circuito secundário do TC, e as necessidades de potencial dos elementos conectados ao secundário são então supridas pela alimentação ativa do circuito de controle e não mais pelo ramo de magnetização do TC.

Foi testado um TC de medição de 0,6 kV / 250-5 A e os seguintes valores característicos para resistência do enrolamento secundário R_2 e indutância secundária de fluxo disperso L_2 foram obtidos:

$$R_2 = 41,5 \text{ m}\Omega \quad \text{e} \quad L_2 = 15,75 \text{ mH}$$

Em medição de baixa tensão, a distância entre os bornes secundários do TC e os bornes do medidor não ultrapassa 0,5 metros o que conduz a uma resistência média dos condutores secundários de $R_f = 5,5 \text{ m}\Omega$.

Em testes de laboratório constatamos que a resistência do elemento sensor de corrente do medidor eletrônico é $R_b \approx 0,6 \Omega$.

Daí,

$$T_d = \frac{L_2}{R_b} = 0,026 \quad (3.44)$$

$$R_{eq} = 1 + \frac{R_f + R_2}{R_b} = 1,078 \Omega \quad (3.45)$$

E conforme as equações 3.38 e 3.39 a função de transferência de tensões entre o ramo de magnetização secundário do TC e o elemento sensor de corrente no processo sem compensação é:

$$V_b = \frac{0,927}{1 + s 0,026} V_2 \quad (3.46)$$

$$G_p(s) = \frac{0,927}{1 + s 0,026} \quad (3.47)$$

O diagrama de Bode na figura 3.6 mostra para o processo sem compensação uma banda de passagem com frequência de corte em 35,2 rad/seg, o que denota uma diferença entre as tensões V_2 e V_b na frequência industrial de 60 Hz ou 377 rad/seg com magnitude

$20\log|G(j\omega)| = -19,8$, ou seja, uma diferença em módulo de 0,1. Com relação ao ângulo entre correntes primária e secundária em 377 rad/seg obteve-se $-83,7^\circ$ pela função de transferência em Bode. Nesta circunstância V_2 é produzida pelo circuito de magnetização do TC e a corrente de magnetização responsável por V_2 conduz a uma divergência na transferência de sinal de corrente do primário para o secundário haja vista que o fasor I_2 será a soma vetorial entre os fasores I_1 e I_0 .

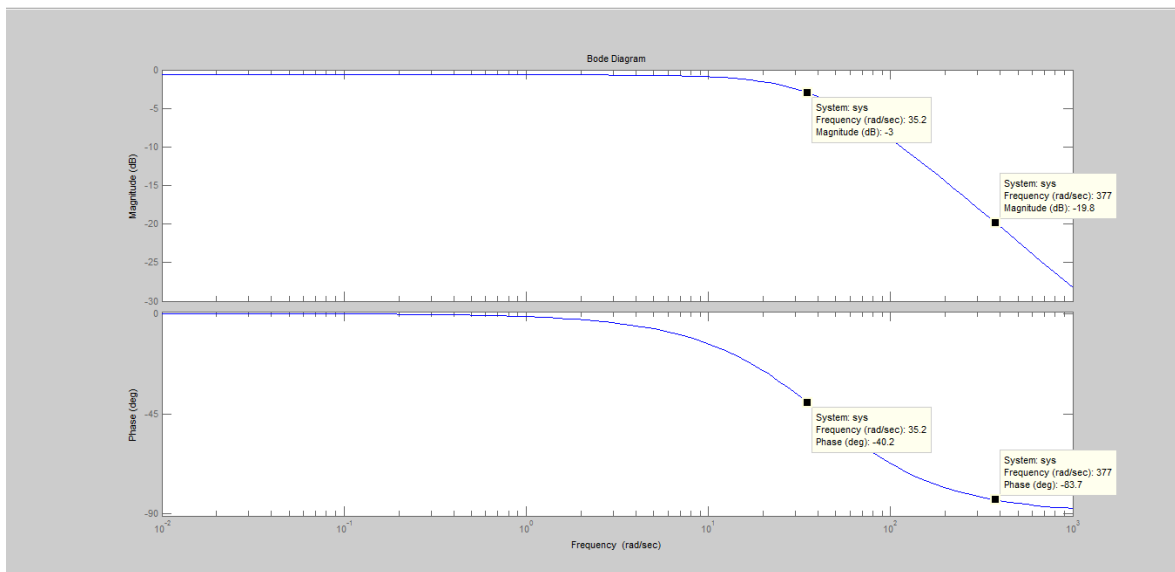


Figura 3.6 – Diagrama de Bode da função V_2 versus V_b .

Fonte: Elaboração própria.

Para implementar o estágio de controle do circuito na figura 3.4 é necessário impor, com relação ao modelo na figura 3.1:

$$\frac{L_2}{R_b} = R_3 C_1 = 0,026 \quad e \quad R_{eq} = \frac{R_4}{R_5} = 1,078 \Omega$$

Os seguintes valores dos componentes são escolhidos:

$$R_3 = 1k\Omega; \quad C_1 = 26\mu F; \quad R_5 = 1k\Omega; \quad R_4 = R_{41} + R_{42}$$

Sendo $R_{41} = 1k\Omega$ e $R_{42} = 75 \Omega$ valores comerciais,

$$R_6 = R_7 = R_8 = 1k\Omega$$

$$R_9 = 100 \Omega$$

A função de transferência do circuito da figura 3.4 é deduzida conforme as equações 3.48, 3.49, 3.50 e apresentada na equação 3.51:

$$\frac{V_c(s)}{V_b(s)} = (-) \left[-\frac{R_4}{R_5} + \left(-R_3 C_1 \frac{s \left(\frac{1}{R_9 C_1} \right)}{s + \left(\frac{1}{R_9 C_1} \right)} \right) \right] \quad (3.48)$$

$$\frac{V_c(s)}{V_b(s)} = \frac{R_4}{R_5} + R_3 C_1 \frac{s \left(\frac{1}{R_9 C_1} \right)}{s + \left(\frac{1}{R_9 C_1} \right)} \quad (3.49)$$

$$\frac{V_c(s)}{V_b(s)} = 1,075 + 0,026 \frac{s \left(\frac{1}{0,0026} \right)}{s + \left(\frac{1}{0,0026} \right)} = G_c(s) \quad (3.50)$$

$$G_c(s) = 1,075 + 0,026 \left[\frac{s \ 384,61}{s + 384,61} \right] \quad (3.51)$$

O diagrama de blocos do transformador de corrente compensado é conforme a figura 3.7.

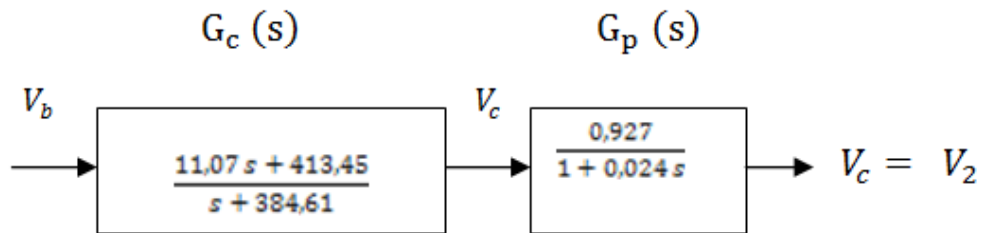


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do transformador de corrente compensado.

Fonte: Elaboração própria.

A função de transferência do processo em série com o controle é:

$$G_{p_serie_c} = \frac{10,2619s + 383,2681}{0,024s^2 + 10,2306s + 384,61} \quad (3.52)$$

O diagrama de Bode do transformador de corrente - conforme figura 3.8 - apresenta em 377 rad/seg um módulo de transferência de -2,02 dB , $20\log|G(j\omega)| = -2,02$ ou $G(j\omega) = 0,79$ e um ângulo de transferência de $-43,8^\circ$.

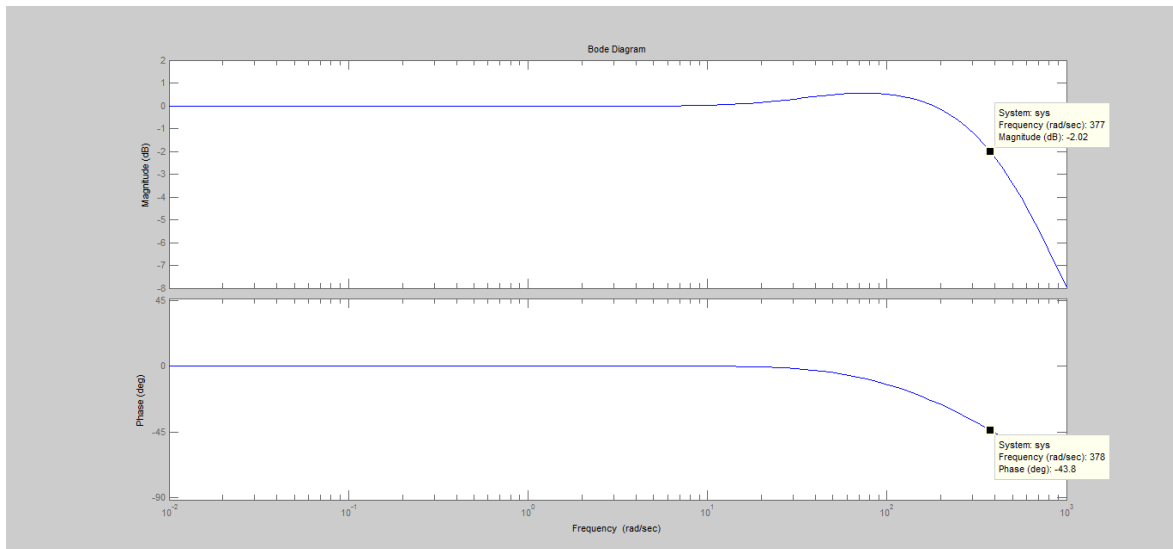


Figura 3.8 – Diagrama de Bode da função de transferência do processo em série com o controle.
Fonte: Elaboração própria.

Com o objetivo de otimizar a resposta, deslocando $|G(j\omega)|$ no diagrama de Bode buscando 0 dB, o que conduz a um ganho unitário que é o objetivo, qual seja, módulo de transferência ser unitário em 377 rad/seg conseguindo $V_c = V_2$, é inserido um ganho de 1,261 – valor definido por tentativa e erro ao tempo em que observávamos em MATLAB a resposta do ganho em dB no diagrama de Bode - conforme o seguinte diagrama de blocos na figura 3.9.

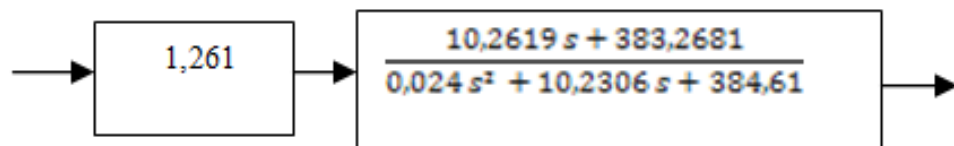


Figura 3.9 – Diagrama de blocos do sistema compensado e com ganho.
Fonte: Elaboração própria.

O sistema controlado com o ganho adicional de 1,261 tem a nova função de transferência G_{sc} :

$$G_{sc} = \frac{12,9403 s + 483,3011}{0,0240 s + 10,2306 s + 384,61} \quad (3.53)$$

A partir da função de transferência do sistema compensado na equação 3.53, o novo diagrama de Bode é obtido conforme a figura 3.10.

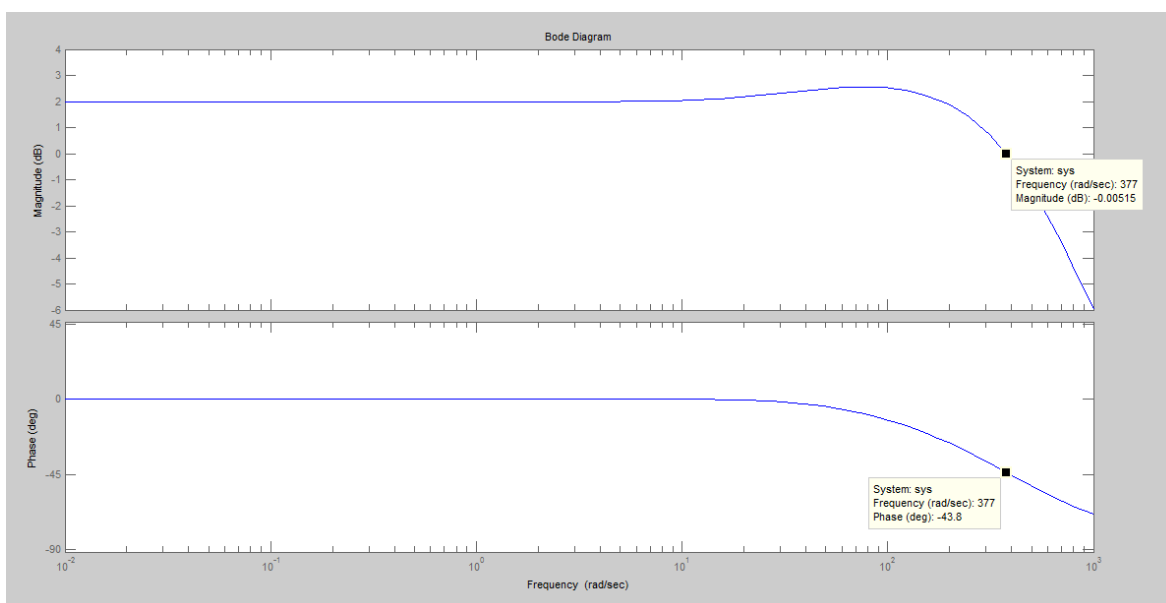


Figura 3.10 – Diagrama de Bode da FT com controle e ganho adicional.
Fonte: Elaboração própria.

O objetivo – produzir uma tensão V_C igual ou muito próxima à tensão V_2 em módulo e em ângulo é alcançado na frequência industrial de 377 rad/seg. O módulo de transferência de -0,00515 dB ou $|G(j\omega)| = 0,99$ e um ângulo de transferência de $-43,8^\circ$ foram obtidos.

Observa-se teoricamente que o incremento do ganho atua no módulo da função de transferência não tendo influência no ângulo, que permaneceu $-43,8^\circ$.

A utilização dos diagramas de Bode auxiliou a redimensionar os componentes do circuito de controle para conseguir o ganho unitário em módulo.

No circuito da figura 3.4 o ganho de 1,261 é obtido escolhendo no estágio somador os valores dos resistores $R_6=R_7= 1\text{k}\Omega$ e o do resistor $R_8=1,261\text{ k}\Omega$.

Os valores encontrados a partir desta análise no domínio da frequência foram utilizados na parte prática deste trabalho, capítulo 4 a seguir.

Capítulo 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das soluções propostas:

- a) implementação de circuito de controle e compensação utilizando hardware;
- b) implementação de algoritmo de compensação com *script* desenvolvido no aplicativo MATLAB.

A solução do circuito de controle utilizando hardwares foi validada com êxito, e a solução por algoritmo foi validada em intervalos de corrente específicos, configurando-se um ensaio analítico para pesquisa sequenciada.

4.1 TC sem o Circuito de Controle e Compensação

Os parâmetros indutância de magnetização, resistência da bobina secundária do TC e indutância de fluxo disperso da bobina secundária do transformador de corrente ensaiado foram obtidos por medições em laboratório, e são aqui utilizados conforme valores da tabela. 3.3 no capítulo 3. O software de simulação PSIM *Powersim* 11.1 foi utilizado.

A figura 4.1 mostra o transformador de corrente para o qual foram coletados os parâmetros de projeto, 250-5 A, 0,6 kV, modelado em PSIM *Powersim* 11.1 com a relação 1:1 para melhor visualização dos erros de exatidão, com o secundário conectado ao elemento sensor de corrente de um medidor de energia elétrica representado por uma resistência de 0,6 Ω , sem a solução de controle de redução dos erros de exatidão. Em laboratório medimos resistências de sensores de corrente de medidores eletrônicos de diversos fabricantes, e encontramos valores entre 0,30 Ω e 0,60 Ω , indicativo da utilização do maior valor – pior caso - na simulação.

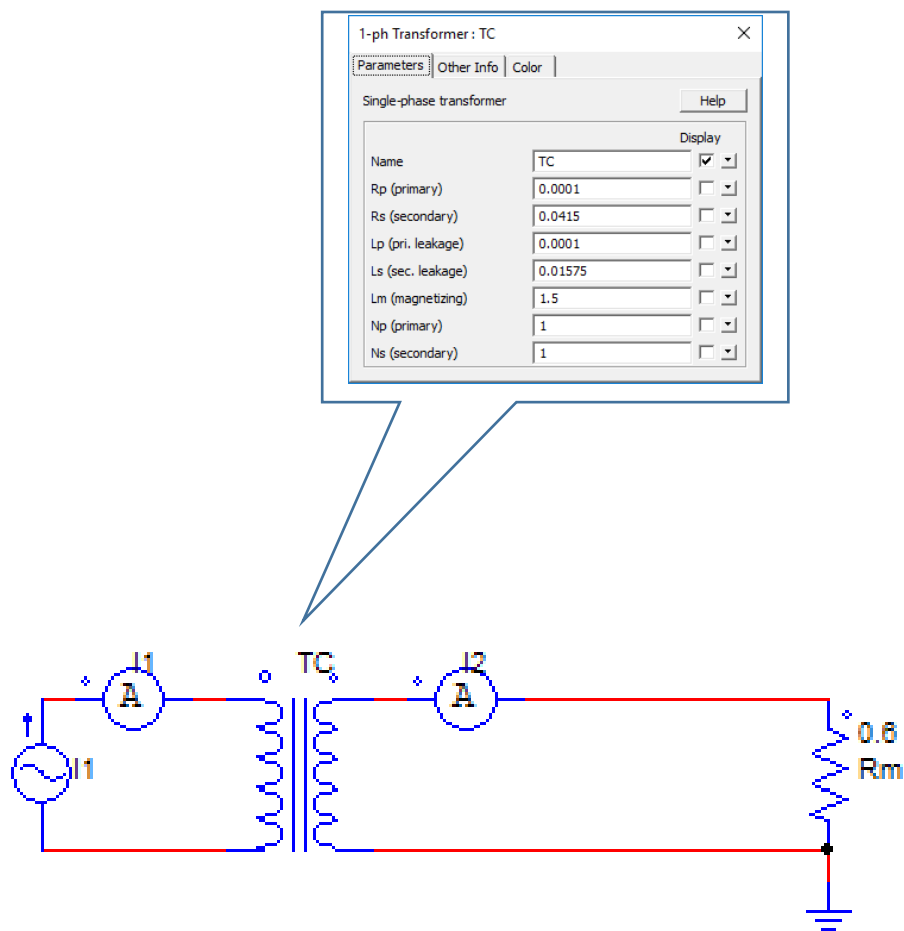


Figura 4.1 – TC conectado a medidor sem circuito de compensação para redução dos erros de exatidão. Resistências em Ω ; na caixa de texto indutâncias em H.
Fonte: Elaboração própria com suporte do aplicativo PSIM Powersim 11.1.

É utilizada uma fonte de corrente senoidal, representando a corrente que flui para a unidade consumidora, corrente 5 A de pico, sendo medidas as correntes em valores RMS para a comparação.

A figura 4.2 mostra os sinais de corrente primária e secundária no transformador de corrente sem circuito de controle e compensação, destacando os valores eficazes de cada um dos sinais. O erro de relação considerando duas casas decimais é obtido como

$$\frac{3,53-3,49}{3,53} \cdot 100 = 1,13\% \quad \text{i.e.} \quad \epsilon = 1,13\%$$

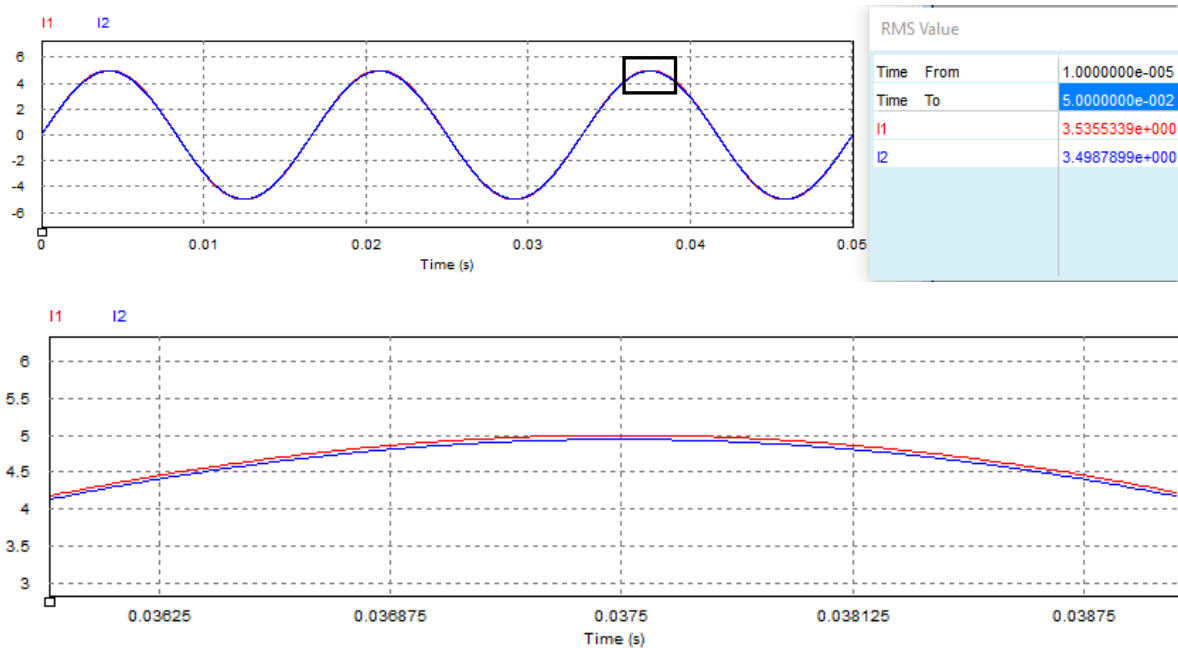


Figura 4.2 – Sinais das correntes primária e secundária do TC sem compensação.

Fonte: Elaboração própria com suporte do aplicativo PSIM Powersim 11.1.

4.2 TC com o Circuito de Controle e Compensação

A solução proposta, figura 4.3, utiliza amplificadores operacionais nas configurações: conversor corrente tensão, seguidor de tensão (*buffer*), inversor, diferenciador e somador.

O módulo de conversão corrente-tensão tem como objetivo mitigar a condição de carga do sensor de corrente do medidor de energia elétrica (R_{carga}) como vista pelo secundário do TC, buscando eliminar virtualmente esta carga do circuito secundário do transformador de corrente. Desta forma a tensão que suprirá R_{carga} não demandará energia do circuito de magnetização do TC e sim, da fonte de potência dos amplificadores operacionais do circuito de controle implementado. Portanto R_{carga} não se comportará como carga para o secundário do TC.

O seguidor de tensão que é um bloco isolador de estágios impedindo o fluxo de corrente entre eles mas sem alterar o nível de sinal monitorado, tem como principal função isolar a realimentação do circuito de controle da entrada do circuito de cálculo das quedas de tensão, mitigando a possibilidade da não atuação da compensação pela realimentação,

posto que evidencia-se através do *buffer* uma alta impedância na entrada do circuito de cálculo. De qualquer forma esta possibilidade de não atuação do controle sem o *buffer* não foi evidenciada, posto que o circuito também foi testado sem o seguidor de tensão e os resultados foram idênticos, compensando, também nesta circunstância, a corrente de excitação do TC.

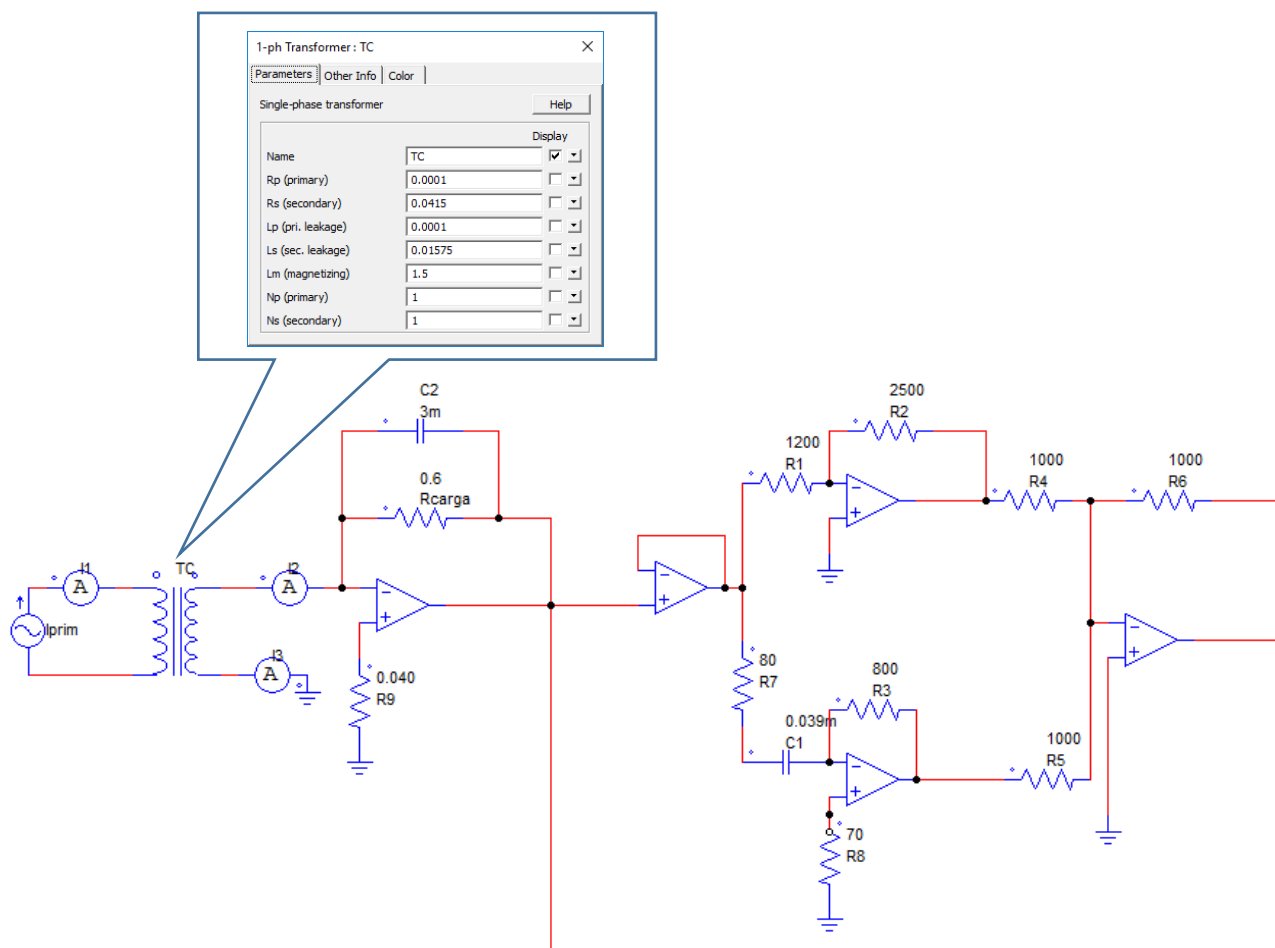


Figura 4.3 – TC conectado a medidor com circuito de compensação para redução dos erros de exatidão. Resistências em Ω ; Capacitâncias em mF. Na caixa de texto indutâncias em H.

Fonte: Elaboração própria com suporte do aplicativo PSIM Powersim 11.1.

O inversor, o diferenciador e o somador operacionalizam o cálculo da equação 3.36, desconsiderando a queda de tensão nos cabos que conectam o secundário do TC ao sensor de corrente do medidor de energia elétrica, como também insere a resistência do sensor de corrente do medidor de energia elétrica $R_{carga}=R_b$ no ramo de realimentação negativa e como consequência reduz a carga secundária do transformador de corrente, possibilitando que uma parcela da energia que viria do circuito magnético do TC seja suprida

pela alimentação ativa do amplificador operacional. O primeiro membro da equação 3.36 aqui é reproduzido como expressão 4.1 para fins de compreensão da explanação a seguir.

$$V_b \left(1 + \frac{R_2}{R_b}\right) + \frac{L_2}{R_b} \frac{dV_b}{dt} \quad (4.1)$$

O circuito de controle e compensação tem como primeiro estágio o amplificador de transresistência para ocultar virtualmente a carga do sensor de corrente do medidor de energia elétrica como vista pelo secundário do transformador de corrente. O segundo estágio compõe-se do *buffer* seguidor de tensão - para que a saída seja isolada da entrada do circuito de cálculo das quedas de tensão secundárias - em função da alta impedância do *buffer*. O terceiro estágio da solução de controle com compensação é o circuito de cálculo das quedas de tensão do secundário do TC e está explanado a seguir.

A primeira função do circuito de cálculo das quedas de tensão é, conforme a expressão 4.1, multiplicar V_b por $1 + \left(\frac{R_2}{R_b}\right)$ de forma que R_2/R_1 na figura 4.3 seja igual a $1 + \left(\frac{R_2}{R_b}\right)$ na figura 3.1. Importante diferenciar o R_2 resistência de feedback do inversor no circuito de controle (figura 4.3) com o R_2 resistência da bobina secundária do TC (figura 3.1). A segunda função do circuito é multiplicar $\frac{dV_b}{dt}$ por $\frac{L_2}{R_b}$, de forma que R_3C_1 na figura 4.3 seja igual a $\frac{L_2}{R_b}$. A terceira função é somar estas duas quedas de tensão. A quarta função é alimentar o sensor de corrente do medidor de energia elétrica R_{carga} com esta tensão, processada em tempo real, no circuito secundário, inibindo o fornecimento da tensão pelo circuito magnético do transformador de corrente. A inserção do capacitor C_2 em paralelo no ramo de realimentação do conversor corrente x tensão comprovou que os erros de exatidão e de ângulo de fase são reduzidos desde que encontrado por sintonia o valor adequado do elemento capacitivo. Uma vez obtidos os valores de R_1 , R_2 , R_3 e C_1 para o circuito de controle, procedeu-se ao ajuste dos mesmos adotando como ponto de partida estes valores. Os melhores valores encontrados foram os indicados no circuito da figura 4.3.

O capacitor C_2 , escolhido empiricamente, com posterior ajuste, altera o fator multiplicativo do conversor corrente tensão de R_b para $R_b / (2\pi f R_b C_2) + 1$, do que deduzimos que a redução de carga secundária é otimizada com a inserção do capacitor C_2 , o que explica a redução adicional do erro de exatidão em função de C_2 .

Interessante observação é que, conhecendo que a indutância de fluxo disperso, que comporta-se como uma reatância de dispersão em série no secundário do TC é $L_2 = 15,75$ mH, a reatância indutiva $X_L = 2\pi fL$, para a frequência industrial de 60 Hz torna-se $X_L = 5,93 \Omega$. Considerando esta impedância série, o capacitor seria componente de um pseudo circuito integrador e a condição de cálculo do capacitor para este tipo de circuito $T = X_2 C_2$ conduz ao valor de C_2 igual a 2,8 mF (sendo $T = 0,016666$ segundos para 60Hz e $X_2 = 5,93 \Omega$), ou seja, aproximadamente os mesmos 3 mF encontrados por tentativa e erro.

O resistor R7 foi inserido para a operacionalização prática do derivativo, cujo valor foi estabelecido como $\frac{1}{10}$ do valor do resistor R3.

Os resistores R8 e R9 foram inseridos para garantir a estabilidade dos respectivos amplificadores operacionais, e calculados conforme a fórmula $R_e = \frac{R_{ni} R_{ra}}{R_{ni} + R_{ra}}$ onde R_{ni} é a resistência em série com a entrada não inversora e R_{ra} é a resistência do ramo de realimentação.

A figura 4.4 mostra os sinais de corrente primária e secundária no transformador de corrente com o circuito de controle e compensação, destacando os valores eficazes de cada um dos sinais. O erro de relação considerando duas casas decimais é obtido como

$$\frac{3,53 - 3,51}{3,53} \cdot 100 = 0,56\% \quad \text{i.e.} \quad \epsilon = 0,56\%$$

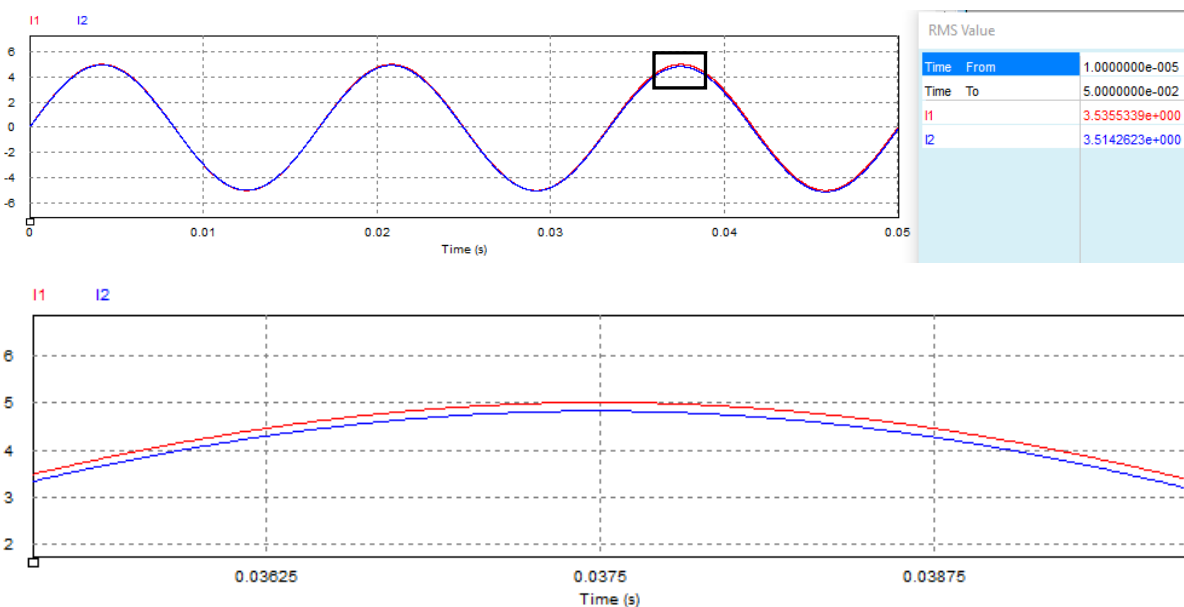


Figura 4.4 – Sinais das correntes primária e secundária do TC com compensação.

Fonte: Elaboração própria com suporte do aplicativo PSIM Powersim 11.1.

A tabela 4.1 apresenta os erros de exatidão encontrados nas simulações realizadas.

Tabela 4. 1
Erros do TC sem e com o circuito de controle

TC 250-5 A / 0,6 kV	Erro de Relação ϵ_r (%)	Erro de Ângulo β (°)
sem compensação	1,13	0,00
com compensação	0,56	0,00

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se expressiva redução no erro de relação mas como já não havia erro de ângulo sem o circuito de compensação, não houve influência do circuito de controle neste quesito.

4.3 Resultados Experimentais com Protótipo

Foi construído um protótipo conforme a figura 4.5, com circuito similar ao simulado conforme figura 4.3, sem o seguidor de tensão e inserido no secundário de um TC de 250-5 A / 0,6 kV. O integrado utilizado foi o ST TL084CN, que contém 4 amplificadores operacionais. O instrumento utilizado para medir os erros sem o circuito de controle e com o circuito de controle foi o *Bird Dog* do fabricante *Spin Lab*. Os resultados encontram-se na tabela 4.2.

Tal como em ambiente de simulação, agora em ambiente de prototipagem observou-se também expressiva redução nos erros de relação e de ângulo com a implementação do circuito de controle projetado.

Tabela 4. 2
Resultados da compensação com o protótipo

TC 250-5 A / 0,6 kV	Erro de Relação ϵ_r (%)	Erro de Ângulo β (°)
sem compensação	0,83	0,21
compensação com o protótipo	0,4	0,09

Fonte: Elaboração própria.

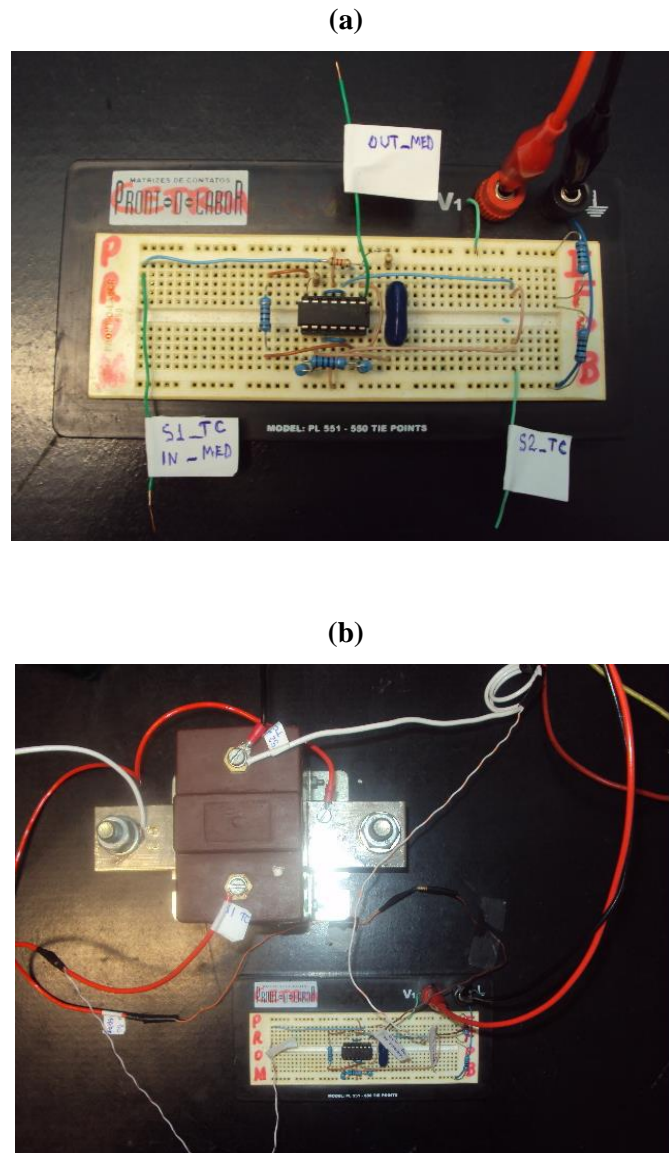


Figura 4.5 – Protótipo do circuito de controle / compensação: (a) detalhe da montagem dos componentes; (b) conectado ao transformador de corrente e fonte de alimentação.

Dados de placa do CI: TL084CN GK6430H8 ST (e4) V6 GK CHN

Fonte: Elaboração própria.

As medições experimentais em protótipo validam o estudo teórico e a simulação implementada. É muito representativa a redução alcançada com o circuito de controle implementado fisicamente. O erro de relação reduziu 0,43% em valor absoluto e reduziu em valor relativo 52%. O ângulo de defasagem reduziu em valor absoluto 0,12° e em valor relativo 57%. Para se ter uma ideia financeira da representatividade, uma demanda de potência medida de 5 MW em uma unidade consumidora, funcionando com esta demanda

durante 500 horas/mês, com um fator de carga 0,69, considerando-se o TC com esta compensação, 22kW de demanda e 10.750 kWh de energia seriam compensados, o que significa aproximadamente R\$ 400,00 / mês na parcela de demanda e R\$ 1.100,00 / mês na parcela de energia, de forma que R\$ 1.500,00 / mês de aporte financeiro seria corretamente mitigado, não prejudicando nenhuma das partes na relação comercial, seja a distribuidora, seja a unidade consumidora.

4.4 Resultados Utilizando Algoritmo de Compensação

A compensação por algoritmo – da exatidão de transformador de corrente instalado em campo – requer que se conheçam as relações entre a densidade de campo magnético e a intensidade de campo magnético que é a característica $B_m \times H$ do núcleo utilizado nos transformadores de corrente em operação, os quais são proporcionalmente relacionados pela permeabilidade. As características do ferro dos TCs conforme a figura 4.8 foi fornecida pelo fabricante e corresponde às propriedades eletromagnéticas do núcleo do TC.

A princípio os TCs tiveram as correntes nos seus secundários registradas em memória de massa a intervalos de integralização horária, bem como as tensões e fatores de potência, estas últimas variáveis para que o algoritmo pudesse avaliar o consumo registrado, haja visto que o valor da energia consumida é o produto entre tensão, corrente, fator de potência e tempo. Sendo o intervalo de integralização de 1 hora, o multiplicador de tempo é a unidade. No apêndice A.1 é apresentado o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

Os valores na tabela 4.4 foram identificados na curva de magnetização da figura 4.8 e expandidos por interpolação em MATLAB. O objetivo é que – a partir das variáveis de influência tensão, corrente secundária e fator de potência da carga – o algoritmo calcule a energia consumida sem compensação dos erros, na sequência calcule os erros, e então proceda ao cálculo da energia consumida com os erros compensados, apresentando ao final a energia corretamente consumida, já com os erros compensados.

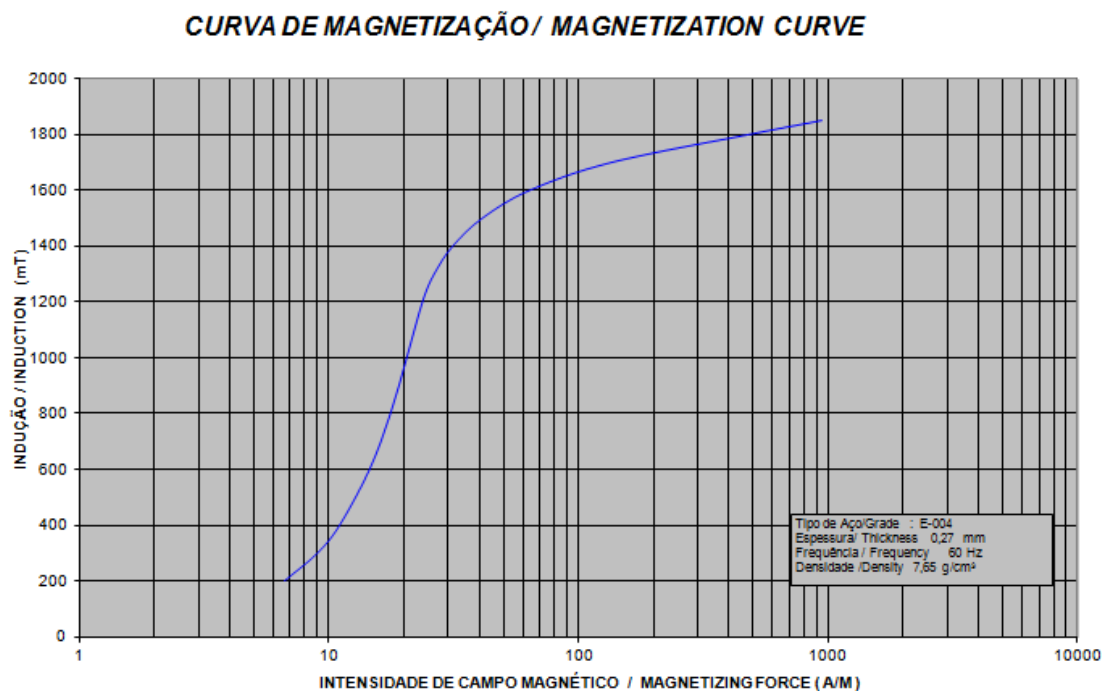


Figura 4.6 – Curva de Magnetização de TC de 15-5 A, encapsulado em conjunto de medição em média tensão, operando em 13,8 kV.

Fonte: MARANGONI MARETTI e BRASFORMER BRASPEL.

A curva de magnetização foi - conforme tabela 4.4 - discretizada em 168 pontos de relação $B_m \times H$. O algoritmo desenvolvido, constante no Apêndice A.3, pesquisa para cada intervalo de integralização da memória de massa de dados de corrente do ponto medido, a corrente fluindo naquele intervalo de integralização, calcula o B daquele intervalo e pesquisa na tabela característica do ferro do TC, $B_m \times H$ discretizada, qual o H correspondente, montando uma nova tabela, agora com o B calculado a partir das correntes medidas *versus* o correspondente H fornecido pelo fabricante do transformador de corrente. Com os Hs encontrados para cada intervalo de integralização horária, e utilizando os valores de comprimento médio do núcleo e número de espiras secundárias, o algoritmo calcula as correntes de excitação em cada intervalo de integralização horária e adiciona a corrente de excitação à corrente secundária medida. Na sequência o algoritmo utiliza as correntes compensadas em cada intervalo de integralização e calcula para cada intervalo a energia realmente consumida, e em seguida soma as energias calculadas em todos os intervalos de integralização do período avaliado, obtendo assim ao final do processo a energia consumida com os erros compensados.

Tabela 4.3
Curva de magnetização do aço E-004

B_m(T)	H(Ae/m)	B_m(T)	H(Ae/m)	B_m(T)	H(Ae/m)	B_m(T)	H(Ae/m)
0,20	6,7	0,62	16,1	1,03	21,8	1,45	35,0
0,21	7,0	0,63	16,1	1,04	22,0	1,46	36,0
0,22	7,3	0,64	16,2	1,05	22,1	1,47	37,0
0,23	7,5	0,65	16,3	1,06	22,2	1,48	38,6
0,24	7,8	0,66	16,4	1,07	22,3	1,49	40,0
0,25	8,0	0,67	16,5	1,08	22,5	1,50	40,6
0,26	8,3	0,68	16,6	1,09	22,7	1,51	41,8
0,27	8,5	0,69	16,7	1,10	22,9	1,52	43,0
0,28	8,7	0,70	16,7	1,11	23,0	1,53	45,0
0,29	8,8	0,71	16,9	1,12	23,1	1,54	46,0
0,30	9,0	0,72	17,2	1,13	23,3	1,55	48,0
0,31	9,2	0,73	17,4	1,14	23,4	1,56	49,0
0,32	9,4	0,74	17,6	1,15	23,5	1,57	50,0
0,33	9,6	0,75	17,9	1,16	23,6	1,58	55,0
0,34	9,9	0,76	18,0	1,17	23,7	1,59	60,0
0,35	10,0	0,77	18,1	1,18	23,8	1,60	65,0
0,36	10,2	0,78	18,2	1,19	23,9	1,61	74,0
0,37	10,4	0,79	18,3	1,20	24,0	1,62	86,0
0,38	10,6	0,80	18,5	1,21	24,3	1,63	93,0
0,39	10,8	0,81	18,6	1,22	24,6	1,64	107,0
0,40	11,0	0,82	18,6	1,23	24,9	1,65	115,0
0,41	11,2	0,83	18,7	1,24	25,2	1,66	124,0
0,42	11,4	0,84	18,8	1,25	25,4	1,67	136,0
0,43	11,6	0,85	18,9	1,26	25,9	1,68	141,0
0,44	11,8	0,86	19,0	1,27	26,0	1,69	146,0
0,45	12,0	0,87	19,0	1,28	26,3	1,70	150,0
0,46	12,2	0,88	19,1	1,29	26,8	1,71	185,0
0,47	12,4	0,89	19,1	1,30	27,0	1,72	225,0
0,48	12,6	0,89	19,2	1,31	27,3	1,73	260,0
0,49	12,8	0,90	19,3	1,32	27,6	1,74	300,0
0,50	14,0	0,91	19,4	1,33	27,9	1,75	335,0
0,51	15,0	0,92	19,4	1,34	29,2	1,76	375,0
0,52	15,1	0,93	19,5	1,35	29,6	1,77	395,0
0,53	15,3	0,94	19,6	1,36	29,8	1,78	435,0
0,54	15,4	0,95	19,7	1,37	30,0	1,79	470,0
0,55	15,5	0,96	19,8	1,38	30,5	1,80	500,0
0,56	15,6	0,97	19,9	1,39	30,7	1,81	570,0
0,57	15,7	0,98	20,0	1,40	31,0	1,82	640,0
0,58	15,8	0,99	20,5	1,41	31,5	1,83	760,0
0,59	15,9	1,00	21,0	1,42	32,0	1,84	850,0
0,60	16,0	1,01	21,2	1,43	33,0	1,85	932,0
0,61	16,0	1,02	21,4	1,44	34,0	1,86	960,0

Fonte: Elaboração própria.

Uma memória de massa mensal de dados de corrente tem aproximadamente 720 intervalos de integralização de 1(uma) hora ou 2880 intervalos de integralização de 15(quinze) minutos. O algoritmo desenvolvido requer que as matrizes de memória de massa e de curva de magnetização sejam de mesma dimensão no segmento colunas. Tendo em

vista que a discretização característica $B \times H$ do TC foi matriciada em 168 pontos, é necessário compensar as correntes em blocos de memória de massa de 168 intervalos de integralização para que as matrizes tivessem correspondência de dimensão. Desta forma a compensação para as correntes e por conseguinte para o consumo de energia da unidade consumidora, nesta solução algorítmica aqui desenvolvida, pode ser realizada em 4 (quatro) blocos semanais de energia de 168 intervalos cada, correspondendo ao período de 4 semanas ou 1 mês de consumo de energia. No caso apresentado no apêndice A.3, o algoritmo foi rodado para 168 intervalos de integralização ou 1 semana de dados de consumo de energia elétrica.

Ao inserir a memória de massa real da unidade consumidora obtida por supervisor a partir de medidor e transformador de corrente instalado em campo, o software após vários passos do algoritmo realizados com sucesso, apresentou erro no passo “Compara B calculado com Curva $B_m \times H$; cria vetores H” (veja fluxograma no apêndice A.1). Identificamos que o problema reside na insuficiência de dados na matriz $B_m \times H$ da curva de magnetização do aço E-004, para valores menores do que 0,2 T e para valores maiores do que 1,8 T, haja visto que algumas correntes da memória de massa levaram a valores de B menores do que 0,2T e maiores do que 1,8 T. Como a curva fornecida pelo fabricante não dispõe de valores menores ou maiores do que este limite, rodamos o algoritmo com correntes na faixa de 3 a 4 A (vide apêndice A.3 ,algoritmo TESTE_TESE_2) porque todos os Bs calculados nesta faixa de corrente produzem Hs na curva do ferro $B_m \times H$ dentro do range disponibilizado pelo fabricante do TC.

Em função da consideração acima, simulamos as correntes de entrada em MATLAB, utilizando a função *rand*, criando 168 correntes aleatórias na faixa de 3 a 4 A para o secundário do TC, tendo sido repetida a simulação diversas vezes com correntes diferentes, sempre neste intervalo, e em todas as ocasiões o aplicativo respondeu satisfatoriamente. A diferença encontrada para o TC estudado foi muito pequena:

$$\text{Energia não corrigida} = 13553520,74 \text{ Wh}$$

$$\text{Energia corrigida} = 13553712,13 \text{ Wh}$$

Estes resultados denotam que a qualidade do ferro do núcleo do TC, conforme fornecido pelo fabricante, é de alto nível e que as correntes de excitação são muito pequenas.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

A redução dos erros de exatidão de relação e de ângulo de fase de transformadores de corrente para medição de energia elétrica foi estudada, tendo sido alcançados resultados satisfatórios com as metodologias propostas.

Após uma apresentação conceitual de sistemas de medição de energia elétrica e da importância dos transformadores de corrente e de potencial para tais sistemas, definiu-se como foco do estudo os TCs e a possibilidade da redução dos erros de exatidão.

A explanação da causa para os erros dos transformadores de corrente é definida ainda na introdução, tendo sido estabelecido que a corrente de excitação é a responsável direta por tais erros, na medida em que é refletida no secundário sem ser componente da corrente primária. As impedâncias próprias do TC e as impedâncias conectadas ao circuito secundário dos transformadores de corrente também são destacadas como ofensores para uma correta reprodução da corrente primária no circuito secundário.

Uma perspectiva histórica dos esforços de pesquisadores foi relatada, configurando-se como referências bibliográficas de partida para suporte àqueles que persigam como objetivo a ampliação das ideias da pesquisa.

O modelo do TC foi desenvolvido e estudado e as normas pertinentes ao tema foram apresentadas, com ênfase no princípio de funcionamento e nos erros de exatidão associados. O diagrama fasorial de corrente foi ilustrado e analisado, destacando-se o impacto da corrente de excitação na diferença indesejável entre as correntes primária e secundária.

Os fluxos, as impedâncias e as quedas de tensão envolvidas foram objeto de estudo comprovando-se serem fatores de influência para os erros de exatidão.

O comportamento da corrente de excitação em função da intensidade da corrente primária foi ilustrado destacando-se, em função da não linearidade, uma maior influência

da magnetização em baixas correntes primárias, e como consequência maiores erros de exatidão nesta faixa de operação.

As faixas limites de erros para as normas brasileira ABNT NBR 6856/2015 e internacional IEC 60044-1/2003 foram reproduzidas evidenciando uma preocupação dos órgãos metrológicos com a qualidade dos sistemas de medição.

Alguns aspectos de projeto com o objetivo de otimizar os erros de exatidão foram apresentados, ressaltando-se as dificuldades encontradas pelos projetistas para o alcance de resultados com excelência.

Os estudos ao longo da pesquisa, os experimentos de simulação e as implementações laboratoriais criaram as condições para a proposição de dois métodos para redução dos erros de exatidão em transformadores de corrente para medição de energia elétrica:

1. A compensação em tempo real da corrente de excitação através de circuito com amplificadores operacionais que alimentado pela tensão instantânea no elemento sensor de corrente do medidor de energia elétrica produz a tensão necessária para alimentar as cargas secundárias do transformador de corrente .
2. A construção de um algoritmo em MATLAB que a partir das características do ferro do núcleo do TC e da memória de massa de tensão, corrente e fator de potência do medidor de energia elétrica identifica as correntes de excitação em intervalos de integração especificados e compensa estas correntes de exatidão, entregando como resultado uma corrente secundária com o mínimo erro de relação.

Os consumidores de energia elétrica no Brasil que são medidos com o uso de transformadores de corrente representam aproximadamente 30% do faturamento das distribuidoras de energia elétrica. Esse expressivo faturamento com o uso de TCs ressalta a importância da minimização dos erros de exatidão nos sistemas de medição de energia elétrica associados. Ambas alternativas estudadas comprovam o potencial das mesmas para a consolidação de confiança na relação entre o consumidor e a distribuidora de energia elétrica.

A pesquisa desenvolvida conduz à necessidade de continuidade do trabalho, com amplas possibilidades de uma consolidação e procedimento futuro para o aperfeiçoamento do processo de medição de energia elétrica. Importante destacar que qualquer implantação

de solução deverá passar pela aprovação da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, antes da efetiva implantação a nível comercial.

O aprofundamento no tema permitirá a pesquisadores que se sintam instigados no interessante assunto, promover a evolução da pesquisa em diversas direções. Neste sentido algumas propostas para trabalhos futuros são colocadas na seção seguinte.

5.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Os estudos realizados durante esta pesquisa e os resultados obtidos sugerem interessantes possibilidades de continuidade na abordagem desse tema, cujas propostas para trabalhos futuros são elencadas nas subseções seguintes.

5.1.1. Circuito de compensação e propostas futuras.

A implantação de um circuito de compensação no secundário de um transformador de corrente reduziu em mais de 50% o erro de relação e em quase 100% o erro de ângulo como visto nos resultados experimentais com protótipo. É interessante que os experimentos neste sentido sejam ampliados para uma gama maior de transformadores de corrente de forma a validar a solução para um amplo universo de transformadores de corrente.

A grande diversidade de características físicas e eletromagnéticas dos TCs instalados em campo torna necessário que os componentes do circuito de compensação sejam diferentes para cada tipo de TC e para cada característica de circuito secundário. Essa customização da solução, que requer diversidade de componentes para uma diversidade de transformadores de corrente poderá tornar mais atrativa a solução por algoritmo do que a solução por circuito de compensação.

A combinação de outras soluções tal como núcleo nanocristalino para baixas perdas associado com o controle compensatório surge como uma interessante proposta de pesquisa futura para otimizar os erros de relação e ângulo.

A possibilidade de trabalhar com circuitos de compensação por corrente e não por tensão é uma outra proposta a ser explorada, procedendo-se à utilização de uma corrente

secundária já compensada antes da utilização da constante de proporcionalidade para obter a corrente primária.

Interessante proposta alternativa para continuidade da pesquisa é estudar a minimização do fluxo primário produzido no núcleo através de um circuito de controle associado a um segundo enrolamento primário produtor de contra fluxo e em série com o circuito de controle, de forma que o fluxo efetivo no núcleo seja reduzido ao mínimo e assim o efeito das correntes parasitas e da corrente de magnetização sejam irrelevantes.

Outra proposta é a implantação de uma fonte controlada de corrente, que forneça a corrente de magnetização, de forma que o sistema de controle seja projetado para seguir esta corrente, independente das condições de carga.

Uma outra alternativa é o estudo da redução dos erros em transformadores de potencial, o qual é posto em operação no sistema de medição em conjunto com os transformadores de corrente, quando a medição é em sistemas de alta tensão.

5.1.2. Algoritmo de compensação e propostas futuras.

A segunda solução estudada nesta pesquisa, por algoritmo de compensação, oferece perspectiva de continuidade para propostas futuras, tais como:

A ampliação da matriz da curva de magnetização do aço $B_m \times H$ para mais do que 168 pontos, sem interpolações, tornando-a flexível para compatibilização com o mesmo número de elementos de cada curva de memória de massa de carga coletada, possibilitando a compensação em um só passo para todo o período do ciclo de faturamento de 30 dias que compreende aproximadamente 720 intervalos de integralização horária.

O aperfeiçoamento do algoritmo, mitigando as suas limitações, e possibilitando uma abrangência plena de 100% dos níveis de carga da unidade consumidora; a elaboração de uma interface mais amigável, com possibilidade inclusive do algoritmo ser em outra linguagem de programação que não o MATLAB.

A implantação de um projeto piloto em distribuidora de energia elétrica na sequência ao aperfeiçoamento do algoritmo será um interessante elemento para validação da eficácia do método de compensação a partir das curvas de memória de massa associadas às características do núcleo do transformador de corrente.

A coleta de memória de massa de correntes secundárias, confrontadas adequadamente com as características do ferro do núcleo do TC, e este conjunto de dados oferecidos como entrada a um algoritmo de compensação, torna possível o recálculo da energia consumida pela carga medida sem os erros da condição inicial. O baixo custo envolvido com esta solução, a praticidade na dispensa de hardwares agregados, a impossibilidade de descontinuidade da solução por defeito em circuito adicional, torna essa uma solução com um amplo campo para continuidade da pesquisa.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992). **Transformador de corrente – especificação**. NBR 6856. Rio de Janeiro,1992. 22p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015). **Transformador de corrente – especificação e ensaios**.NBR 6856.Rio de Janeiro,2015. 111p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992). **Transformador de corrente – método de ensaio**. NBR 6821. Rio de Janeiro,1992. 19p.

ASTROM K. J. e WITTENMARK B. (1997). **Computer Controlled Systems**, , 3ª ed. New Jersey. NJ: Prentice Hall, 1997. 557 p.

BACCIGALUPI, Aldo e LICCARDO, Annalisa (2007). **Compensation of Current Transformers , Proceedings of IMTC Instrumentation and Measurement Technology Conference**, pp. 1-6, Warsaw, Poland, May, 1-3, 2007.

BACCIGALUPI, Aldo e LICCARDO, Annalisa (2009). **Low-Cost Prototype for the Electronically Compensation of Current Transformers** , IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No 6, pp. 641-647, June 2009.

BALBINOT, Alexandre e BRUSSAMARELO, Valner J. (2010). **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**,vol. 1, 2ª ed. Rio de Janeiro. RJ: LTC, 2010. 385 p.

BALBINOT, Alexandre e BRUSSAMARELO, Valner J. (2010). **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**,vol. 2, 2ª ed. Rio de Janeiro. RJ: LTC, 2010. 492 p.

BIS BUREAU OF INDIAN STANDARDS (2012). **Instrument Transformers part 1 – current transformers**, vol. 2, 2ª ed. Rio de Janeiro. RJ: LTC, 2010. 492 p. ICS New Dehli, 2012. 51p.

BRITO, L. C. G. de (2011). **Avaliação dos Erros dos Transformadores de Corrente em Medições de Sincrofasores e Suas Aplicações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. 167p.

BROOKS, H. B. e HOLTZ, F. C (1922). **The Two Stage Current Transformer** , AIEEE Annual Convention. Journal A.I.E.E, pp. 389-398 Niagara Falls, Ontario, June, 26-30, 1922.

CEPISCA, C. et al (2008). **Passive and Active Compensations for Current Transformers** , Metrologie, pp. 5-10, April 2008.

DAPONTE, P (1995). **Electronically Compensated Current Transformer Modelling**, Measurement, Nº 15 , p.p. 213-222, 1995.

DAVID, C. Yu et al (2001). **Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No 2, pp. 189-194, April 2001.

EDEL, Thomas G (2003). **Method and Apparatus for Compensation of Current Transformer Error**, US Patent no 2003 / 6590380. July, 2003.

EDISON ELECTRIC INSTITUTE, EEI (2002). **Handbook for Electricity Metering** , 10ª ed. Washington, DC: EEI Publication, 2002. 584 p.p.

FERNS, J. L. (1949). **Meter Engineering** , 5th ed. London, UK: Sir Isaac Pitman and Sons, 1949. 350p.p.

FRANCO, Sergio (2002). **Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits** , 3ª ed. San Francisco, CA, USA: Mc Graw Hill, 2002. 658 p.

GALLO, Daniele, LANDI, Carmine and LUISO Mario (2010). **Real Time Digital Compensation of Current Transformers Over a Wide Frequency Range**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No 5, pp. 1119-1126, May 2010.

GARCIA, C (2009). **Modelagem e Simulação** , 2ªed. São Paulo, SP: Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2009. 678p.p.

GASPARINI, F. et al (1970). **Error Compensation Apparatus for Instrument Transformers**, US Patent no 1970 / 3497793. February, 1970.

GILAT, Amos (2012). **MATLAB – com aplicações em engenharia**. 4ªed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2012. 417p.p.

GRUITER, Arthur François de (1988). **Amplificadores Operacionais – fundamentos e aplicações**, 1ªed. São Paulo, SP: Makron Books, 1988. 251 p.

HANSELMAN, Duane e LITTLEFIELD, Bruce (1999). **MATLAB 5 – guia do usuário**. 1ªed. São Paulo, SP: Makron Books, 1999. 413 p.

HANSELMAN, Duane e LITTLEFIELD, Bruce (2003). **MATLAB 6 – curso completo**. 1ªed. São Paulo, SP: Prentice Hall, 2003. 676 p.

HOBSON, A. (1953). **The Zero-Flux Current Transformer** , AIEE Southern District Meeting, Louisville, USA, April 22-24, 1953.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC (2003). **Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers**. IEC 60044-1. Geneva, Switzerland, 2003. 111p.

JALMUZNY, Wieslaw (2005). **Measuring Accuracy of Electric Energy in HV Power Networks**, Electrical Power Quality and Utilization Journal, Vol. XI, No 1, pp.3-15, 2005.

JÚNIOR, Antônio Pertence (2003). **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**, 6ªed. Porto Alegre, RS: Editora Bookman, 2003. 304 p.

KANG et al (1997). **An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No 1, pp. 116-124, January 1997.

KANG et al (2011). **Development of a compensation algorithm for a measurement current transformer**, IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 5, No 5, pp. 531-539, 2011.

LANGER, George O. et al (2012). **Error Compensation for Current Transformers Sensors**, US Patent no 2012 / 0268100. October, 2012.

LIMA, Dorival Kitakawa (2009). **Transformadores para Instrumentos Óticos: Aspectos da Viabilidade do seu uso pelas Empresas do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – EPUSP, Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2009. 123 p.p.

LOCCI, Nicola, e MUSCAS, Carlo (2000). **A Digital Compensation Method for Improving Current Transformer Accuracy**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No 4, pp. 1104-1109, October 2000.

LOCCI, Nicola, e MUSCAS, Carlo (2001). **Hysteresis and Eddy Currents Compensation in Current Transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No 2, pp. 154-159, April 2001.

LUCIANO, B. A. e CASTRO, W. B.(2011). **Transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de metal amorfo**, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Vol. 6, No 1, pp. 01-05, January 2011.

LUCIANO, B. A. et al (2013). **Influence of magnetic permeability in phase error of current transformers with nanocrystalline alloys cores**, Journal of Alloys and Compounds, disponível em www.elsevier.com/locate/jalcom, pp. S228-S230, November 2013.

MEDEIROS FILHO, S. de (1980). **Medição de Energia Elétrica**, 2ª ed. Recife, PE: Editora Universitária UFPE, 1980. 483 p.

MENESES, Leonardo. T. e MAITELLI, André. L. (2016). **A Proposal for Improving the Current Transformers Accuracy**, IEEE Latin America Transactions, Vol. 14, Nº 2, February 2016.

MENESES Leonardo. T. e MAITELLI, André. L. (2014). **Redução de Erros de Exatidão em Sistemas de Medição de Energia Elétrica Indireta**, XXI SENDI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Santos, Brasil, Nov 9-13, 2014.

MILJANIC, P. N. (1970). **Current Transformer with Internal Error Compensation**, US Patent, 1970 / 3534247. October, 1970.

MILKOVIC, Miran (1980). **Apparatus and Method of Phase Shift Compensation of an Active Terminated Current Transformer**, US Patent no 1980 / 4198595. April, 1980.

MILKOVIC, Miran (1976). **Current Transformer with Active Load Termination**, US Patent no 1974 / 3815013. June 1974 and reissued no 1976/28851. June, 1976.

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico (2011). **Módulo 12 – medição para faturamento**, revisão 2.0, vigência 11nov2011. In www.ons.org.br, consulta em 21nov2016.

PREUSSE, Norbert et al (2006). **Current Transformer for a Compensating Current Sensor**, US Patent no 2006 / 7057485. June, 2006.

RASHTCHI, Vahid et al (2008). **Optimal Design of Measurement-Type Current Transformer Using Genetic Algorithm**, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy, Johor Baharu, Malaysia, December 1-3, 2008.

SANKARAN, P. e MURTI, V.G.K (1971). **Electronic Error Compensation of a Current Transformer**, Electronic Letters, Vol. 7, No 12, pp. 327-328, June 1971.

SANTOS, Alejandro e SLOMOVITZ, Daniel (2006). **Compensación de Errores em Transformadores de Corriente em Redes de Alta Tensión**, IEEE Latin America Transactions, Vol. 4, No 3, pp.165-169, May 2006.

SEABRA, Antônio Carlos (2000). **Amplificadores Operacionais**, 1ª ed. São Paulo, SP: Editora Érica, 2000. 190 p.

SIMONE, Gilio Aluisio (2013). **Transformadores**, 1ª ed. São Paulo, SP: Editora Érica, 2013. 312 p.

SLEMON, Gordon (1974). **Equipamentos Magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas**, Vol. 1, 1ª ed. Rio de Janeiro, GB: Editora da Universidade de São Paulo, 1974. 240 p.

SLOMOVITZ, D. e SANTOS, A. (2012). **A self calibrating instrument current transformer**, 2012.Montevideo,ELSEVIER,In www.elsevier.com/locate/measurement.

SLOMOVITZ, Daniel (2000). **Electronic Error Reduction System for Clamp-On Probes and Measuring Current Transformers**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,, Vol. 49, No 6, pp. 1279-1281, December 2000.

SLOMOVITZ, Daniel (2003). **Electronic System for Increasing the Accuracy of In- Service Instrument-Current Transformers**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,, Vol. 52, No 2, pp. 408-410, April 2003.

SONG Y. H., BAO, H. and AI, X. (2005). **Novel Method of Error Current Compensation for Hall Effect based High Accuracy Current Transformer** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, Nº 1, pp. 11-13, January, 2005.

SPINLAB 6000 & 5000, **Bird Dog Plus Instruction Manual**. Version 7.52. Knoxville, TN/USA: Spinlab Utility Instrumentation Inc. 324 p.

STAUDT, Tiago (2009). **Estudo de Transformadores de Corrente utilizados em Instrumentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – PPGEE da, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2009. 125 p.p.

WENTZ, E. C. (1934). **Compensated Current Transformer**, US Patent no 1934 / 1955317. April, 1934.

WILLIAMS, Jim. et al (1991). **Analog Circuit Design – Art, Science and Personalities**, 1st ed. Solana Beach, CA, USA: Butterworth Heinemann / Elsevier, 1991. 389 p.

WILSON, M. S. (1929). **A New High Accuracy Current Transformer**, Winter Convention of the AIEE, New York, USA, Jan 28-Feb 1, 1929.

WINDSHEIMER, K. (2001). **Method and Device for Compensating for Angle Errors when Measuring Electrical Power**, US Patent no 2001 / 6239589 B1. May, 2001.

WISZNIEWSKI, A. e SARMA, S. V. N. (1970). **Analogue-Computer Study of Error in Linearising Nonlinear Magnetisation Curve of Current Transformer**, Proceedings of IEE, Vol. 117, No 1, pp. 141-143, Jan 1970.

YU, David C. et al (2001). **Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No 2, April 2001.

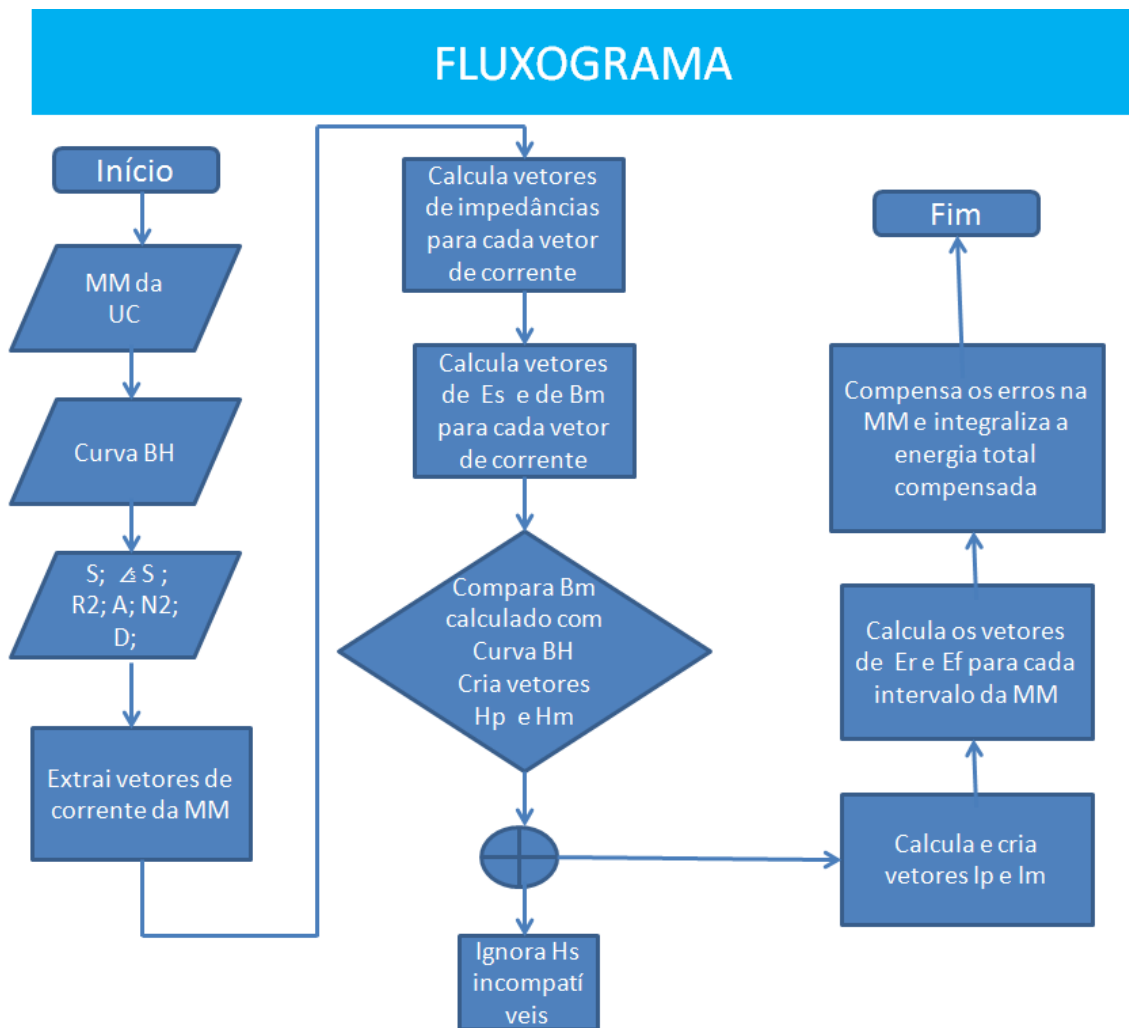
XU, Q. REFSUM, A e WATSON (1991). **A New Method to Compensate Current Transformer Using Microprocessors**, IEEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, China, November 1991.

XU, Q. REFSUM, A e WATSON (1996). **Application of external compensation to current transformers**, IEEE Proceedings Science Measurement Technology, Vol. 143, No 2, pp. 147-150, March 1996.

ZHENG, Thai-Ying et al (2009). **Development of a compensation algorithm for an iron-cored measurement current transformer**, IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania, July 2, 2009.

Apêndice

A.1 Fluxograma de compensação com algoritmo



A.2 Algoritmo TESTE_TESE_1

ALGORITMO DIDÁTICO PARA ENTENDIMENTO DA LÓGICA TESTE_TESE_1

%PROGRAMA PARA COMPENSAÇÃO DE ERROS DE EXATIDÃO EM TRANSFORMADOR DE CORRENTE NO PERÍODO DE 24 HORAS.

formatbank% padroniza os resultados com 2 casas decimais

% 1. INICIALIZANDO O VETOR DE CORRENTES SECUNDÁRIAS DO TC

I2TC=[5 1 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2]

% 2. INICIALIZANDO AS TENSÕES FASE NEUTRO NO PRIMÁRIO DO TC

V2fn= [220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219 220 220 219 218 217 216 216 217 217 218]

%3. INICIALIZANDO OS FATORES DE POTÊNCIA POR FASE

COS_fi=[0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80]

% 4. COMANDOS DE ENTRADA DOS DADOS CONSTRUTIVOS DO TC

STC=input('Entre com STC, a disponibilidade de potência aparente do TC em VA');

COSFISTC=input('Entre com COSFISTC, o fator de potência da STC do transformador de corrente');

R2=input('Entre com R2, a resistência das espiras secundárias do TC no formato r + jx');

ATC=input('Entre com ATC, a área transversal do caminho magnético do TC');

N2=input('Entre com N2, o número de espiras secundárias do TC');

DIAMTC=input('Entre com DIAMTC, o diâmetro médio do transformador de corrente');

% 5. CALCULANDO A ÁREA LÍQUIDA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO TC DEVIDO À
% LAMINAÇÃO DO NÚCLEO

ALTC=0.9*ATC

% 6. CALCULANDO O CAMINHO MÉDIO DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO TC

CAMMEDIO= pi.*DIAMTC

% 7. CALCULANDO A IMPEDÂNCIA BURDEN DO TC

MODZB=STC./((5).^2) %calculando o módulo da impedância burden do TC

FISTC=acosd(COSFISTC) % calculando o ângulo FISTC da potência aparente do TC

REALZB=MODZB.*cosd(FISTC) % criando o vetor parte real de impedância burden do TC

IMAGZB=MODZB.*sind(FISTC)% criando o vetor parte imaginária de impedância burden do TC

COMPZB=complex(REALZB,IMAGZB) % cria o vetor complexo de impedância burden do TC

ABSZB=abs(COMPZB)

% 8. CALCULANDO A IMPEDÂNCIA TOTAL SECUNDÁRIA IMPOSTA AO TC

ZFB=R2+COMPZB % cria o vetor resistência dos fios secundários + impedância burden do TC

```
ANGZFB=angle(ZFB) % retorna o ângulo do vetor resistência dos fios secundários + impedância burden do TC
```

```
% 9. CALCULANDO O VETOR DE TENSÕES INDUZIDAS NO SECUNDÁRIO DO TC
```

```
E2=abs(ZFB).*I2TC % cria o vetor de tensões secundárias do TC
```

```
% 10. CALCULANDO O VETOR DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO RELACIONADO ÀS FORÇAS  
% ELETROMOTRIZES INDUZIDAS NO SECUNDÁRIO DO TC
```

```
Bm=E2./(4.44.*ALTC.*60.*N2) % cria o vetor de indução magnética (densidade de fluxo) do TC
```

```
% 11. INICIALIZANDO A MATRIZ B x H DO FERRO DO NÚCLEO DO TC
```

```
B_x_H=[1:1:24;2:1:25]
```

```
% 12. PESQUISANDO NA MATRIZ DE CARACTERÍSTICAS B x H DO FERRO DO NÚCLEO  
% DO TC QUAIS OS VALORES DE H QUE CORRESPONDEM AOS VALORES DE B NO VETOR  
% DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO
```

```
CBM=length(Bm)% identifica o número de colunas de Bm
```

```
for n=1:CBM % localiza na primeira linha da matriz BH em qual coluna k estão os elementos da matriz BM  
k=find(B_x_H(1,:)==round(Bm(1,n))) % localiza na primeira linha da matriz BH em qual coluna k estão os  
elementos da matriz BM
```

```
y(n)=B_x_H(2,k) % Cria o vetor linha C com os elementos da 2ª linha de B_x_H que são os respectivos  
correspondentes aos valores do vetor Bm
```

```
end
```

```
Bm_X_Hm=[Bm; y] % encontra os valores de Hm correspondentes aos valores de Bm calculados a partir das  
correntes da memória de massa da UC
```

```
% 13. CALCULANDO A CORRENTE DE EXCITAÇÃO PARA CADA CORRENTE SECUNDÁRIA EM  
% SEUS RESPECTIVOS INTERVALOS DE INTEGRALIZAÇÃO DA MEMÓRIA DE MASSA
```

```
Hm=Bm_X_Hm(2,:) % extrai o vetor de campo magnético correspondente a cada corrente secundária da  
memória de massa e o chama de Hm
```

```
Ie=(C/MEDIO/N2)*Hm % calcula as correntes de excitação para cada corrente secundária da memória de  
massa
```

```
% 14. CALCULANDO OS ERROS DE RELAÇÃO PARA CADA INTERVALO DE INTEGRALIZAÇÃO  
% DA MEMÓRIA DE MASSA DE CORRENTES DA UNIDADE CONSUMIDORA
```

```
Itot=I2TC + Ie% calcula a corrente secundária somada à corrente de excitação em cada intervalo de integri-  
zação
```

```
erro_relacao= Ie./Itot
```

```
% 15. CALCULANDO AS CORRENTES PRIMÁRIAS CORRIGIDAS
```

```
I1TC=I2TC*N2 % calcula as correntes primárias intervalo a intervalo de integralização
```

```
I1TC_corrigida=I1TC+erro_relacao % corrige a corrente primária adicionando o erro de relação
```

```
% 16. CALCULANDO A MATRIZ DE POTÊNCIAS (DEMANDAS) SEM CORRIGIR OS ERROS DO  
% TC
```

```
S_ao_corrigida=I1TC.*V2fn.*COS_fi
```

$S_{nao_corrigida_tot} = \text{sum}(S_{nao_corrigida})$

% 16. CALCULANDO A MATRIZ DE POTÊNCIAS (DEMANDAS) CORRIGIDAS EM INTERVALO DE
% INTEGRALIZAÇÃO HORÁRIA

$S_{corrigida} = I_{TC_corrigida} \cdot V_{2fn} \cdot \text{COS_fi}$

$S_{corrigida_tot} = \text{sum}(S_{corrigida})$

TELA DE SAÍDA PARA O ALGORITMO TESTE_TESE_1

I_{2TC} =

Columns 1 through 11

5.00	1.00	3.00	3.00	3.00	3.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 12 through 22

4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 23 through 24

2.00	2.00
------	------

V_{2fn} =

Columns 1 through 11

220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00	220.00	217.00	217.00	217.00
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 12 through 22

218.00	219.00	219.00	220.00	220.00	219.00	218.00	217.00	216.00	216.00	217.00
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 23 through 24

217.00	218.00
--------	--------

COS_{fi} =

Columns 1 through 11

0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 12 through 22

0.95	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 23 through 24

0.80	0.80
------	------

Entre com STC, a disponibiidade de potência aparente do TC em VA30

Entre com COSFISTC, o fator de potência da STC do transformador de corrente0.8

Entre com R2, a resistência das espiras secundárias do TC no formato r + jx0.124

Entre com ATC, a área transversal do caminho magnético do TC0.0015

Entre com N2, o número de espiras secundárias do TC4

Entre com DIAMTC, o diâmetro médio do transformador de corrente0.1

ALTC =

0.00

CAMMEDIO =

0.31

MODZB =

1.20

FISTC =

36.87

REALZB =

0.96

IMAGZB =

0.72

COMPZB =

0.96

ABSZB =

1.20

ZFB =

1.08

ANGZFB =

0.59

E2 =

Columns 1 through 11

6.51	1.30	3.90	3.90	3.90	3.90	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 12 through 22

5.21	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	2.60	2.60	2.60	2.60
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 23 through 24

2.60	2.60
------	------

Bm =

Columns 1 through 11

4.52	0.90	2.71	2.71	2.71	2.71	3.62	3.62	3.62	3.62	3.62
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 12 through 22

3.62	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	1.81	1.81	1.81	1.81
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 23 through 24

1.81 1.81

B_x_H =

Columns 1 through 11

1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00
2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00

Columns 12 through 22

12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00
13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00

Columns 23 through 24

23.00	24.00
24.00	25.00

CBM =

24.00

k =

5.00

y =

6.00

k =

1.00

y =

6.00 2.00

k =

3.00

y =

6.00 2.00 4.00

k =

3.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00

k =

3.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00

k =

3.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00

k =

4.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00

k =

4.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00

k =

4.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00

k =

4.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00

k =

4.00

y =

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

k =

4.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Column 12

5.00

k =

3.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 13

5.00 4.00

k =

3.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 14

5.00 4.00 4.00

k =

3.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 15

5.00 4.00 4.00 4.00

k =

3.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 16

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00

k =

3.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 17

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00

k =

3.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 18

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00

k =

2.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 19

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00

k =

2.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 20

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00

k =

2.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 21

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00 3.00

k =

2.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 22

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00 3.00 3.00

k =

2.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 22

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00 3.00 3.00

Column 23

3.00

k =

2.00

y =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 22

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00 3.00 3.00

Columns 23 through 24

3.00 3.00

Bm_X_Hm =

Columns 1 through 11

4.52 0.90 2.71 2.71 2.71 2.71 3.62 3.62 3.62 3.62 3.62
6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 22

3.62 2.71 2.71 2.71 2.71 2.71 2.71 1.81 1.81 1.81 1.81
5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00 3.00 3.00

Columns 23 through 24

1.81 1.81
3.00 3.00

Hm =

Columns 1 through 11

6.00 2.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00

Columns 12 through 22

5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 3.00 3.00 3.00 3.00

Columns 23 through 24

3.00 3.00

le =

Columns 1 through 11

0.47 0.16 0.31 0.31 0.31 0.31 0.39 0.39 0.39 0.39 0.39

Columns 12 through 22

0.39 0.31 0.31 0.31 0.31 0.31 0.31 0.24 0.24 0.24 0.24

Columns 23 through 24

0.24 0.24

ltot =

Columns 1 through 11

5.47 1.16 3.31 3.31 3.31 3.31 4.39 4.39 4.39 4.39 4.39

Columns 12 through 22

4.39 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 2.24 2.24 2.24 2.24

Columns 23 through 24

2.24 2.24

erro_relacao =

Columns 1 through 11

0.09 0.14 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09

Columns 12 through 22

0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.09 0.11 0.11 0.11 0.11

Columns 23 through 24

0.11 0.11

l1TC =

Columns 1 through 11

20.00 4.00 12.00 12.00 12.00 12.00 16.00 16.00 16.00 16.00 16.00

Columns 12 through 22

16.00 12.00 12.00 12.00 12.00 12.00 12.00 8.00 8.00 8.00 8.00

Columns 23 through 24

8.00 8.00

I1TC_corrigida =

Columns 1 through 11

20.09 4.14 12.09 12.09 12.09 12.09 16.09 16.09 16.09 16.09 16.09

Columns 12 through 22

16.09 12.09 12.09 12.09 12.09 12.09 12.09 8.11 8.11 8.11 8.11

Columns 23 through 24

8.11 8.11

S_nao_corrigida =

Columns 1 through 11

3960.00 795.60 2376.00 2365.20 2365.20 2354.40 3328.80 3344.00 3298.40 3298.40 3298.40

Columns 12 through 22

3313.60 2102.40 2102.40 2112.00 2112.00 2102.40 2092.80 1388.80 1382.40 1382.40 1388.80

Columns 23 through 24

1388.80 1395.20

S_nao_corrigida_tot =

55048.40

S_corrigida =

Columns 1 through 11

3977.05 822.60 2394.77 2383.88 2383.88 2373.00 3347.40 3362.68 3316.83 3316.83 3316.83

Columns 12 through 22

3332.11 2119.01 2119.01 2128.68 2128.68 2119.01 2109.33 1407.10 1400.61 1400.61 1407.10

Columns 23 through 24

1407.10 1413.58

S_corrigida_tot =

55487.69

A.3 Algoritmo TESTE_TESE_2

ALGORITMO TESTE_TESE_2 QUE FUNCIONOU SATISFATÓRIAMENTE PARA CORRENTES SECUNDÁRIAS DO TC NO INTERVALO ENTRE 3 E 4 AMPÉRES EM 168 INTERVALOS DE INTEGRALIZAÇÃO OU 7 DIAS DE CONSUMO DE ENERGIA.

```
%PROGRAMA PARA COMPENSAÇÃO DE ERROS DE EXATIDÃO EM TRANSFORMADOR DE CORRENTE

% VALORES PARA TESTE: S=30VA cosfi=0.8 Rs=0.200 ohm ATC= 0.0006 m2 Ns=120 diam=0.100 m
% VALORES ACIMA FORAM FORNECIDOS PELO FABRICANTE PARA TC DE 15 KV E RELAÇÃO 15-5 A

formatbank% padroniza os resultados com 2 casas decimais
% 1. INICIALIZANDO O VETOR DE CORRENTES SECUNDÁRIAS DO TC
I2TC=1*rand(1,168)+3 % criando 168 correntes randômicas entre 3 A e 4 A
%I2TC= linspace(3,4,168) % SIMULAÇÃO DE CORRENTES SECUNDÁRIAS DO TC ENTRE 3 E 4 AMPÉRES EM
7 DIAS OU 168 INTERVALOS HORÁRIOS DE INTEGRALIZAÇÃO )

C_I2TC=length(I2TC)

% 2. INICIALIZANDO AS TENSÕES FASE NEUTRO NO PRIMÁRIO DOS TCS
V2fn= [ 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219 220 220 219 218 217 216
216 217 217 218 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219 220 220 219 218
217 216 216 217 217 218 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219 220 220
219 218 217 216 216 217 217 218 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219
220 220 219 218 217 216 216 217 217 218 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218
219 219 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219 220 220 219 218 217
216 216 217 217 218 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 217 218 219 219 220 220 219
218 217 216 216 217 217 218 220 221 220 219 219 218 219 220 217 217 ]
C_V2fn=length(V2fn)

%3. INICIALIZANDO OS FATORES DE POTÊNCIA POR FASE
COS_fi=[ 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80
0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80
0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95
0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95
0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95
0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90
0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80
0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80
0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80
0.92 0.92 0.92 0.92 0.92 0.92 0.92 0.92 ]
C_COS_fi=length(COS_fi)

% 4. COMANDOS DE ENTRADA DOS DADOS CONSTRUTIVOS DO TC
STC=input('Entre com STC, a disponibiidade de potência aparente do TC em VA');
COSFISTC=input('Entre com COSFISTC, o fator de potência da STC do transformador de corren-
te');
R2=input('Entre com R2, a resistência das espiras secundárias do TC ');
ATC=input('Entre com ATC, a área transversal do caminho magnético do TC');
N2=input('Entre com N2, o número de espiras secundárias do TC');
DIAMTC=input('Entre com DIAMTC, o diâmetro médio do transformador de corrente');

% 6. CALCULANDO O CAMINHO MÉDIO DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO TC
CAMMEDIO= pi.*DIAMTC

% 7. CALCULANDO A IMPEDÂNCIA BURDEN DO TC
```

```

MODZB=STC./((5).^2) %calculando o módulo da impedância burden do TC
FISTC=acosd(COSFISTC) % calculando o ângulo FISTC da potência aparente do TC
REALZB=MODZB.*cosd(FISTC) % criando o vetor parte real de impedância burden do TC
IMAGZB=MODZB.*sind(FISTC) % criando o vetor parte imaginária de impedância burden do TC

% 8. CALCULANDO A IMPEDÂNCIA TOTAL SECUNDÁRIA IMPOSTA AO TC
ZFB=R2+REALZB+IMAGZB*i % cria o vetor resistência dos fios secundários + impedância burden
do TC
ANGZFB=angle(ZFB) % retorna o ângulo do vetor resistência dos fios secundários + impedância
burden do TC

% 9. CALCULANDO O VETOR DE TENSÕES INDUZIDAS NO SECUNDÁRIO DO TC
E2=abs(ZFB).*I2TC % cria o vetor de tensoes secundárias do TC

% 10. CALCULANDO O VETOR DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO REALCIONADO ÀS FORÇAS
% ELETROMOTRIZES INDUZIDAS NO SECUNDÁRIO DO TC
Bm=E2./(4.44.*ATC.*60.*N2) % cria o vetor de indução magnética (densidade de fluxo) do TC
Bm=roundn(Bm,-2) % arredonda os elementos de Bm para duas casas decimais

% 11. INICIALIZANDO A MATRIZ B x H DO FERRO DO NÚCLEO DO TC FORNECIDA
% PELO FABRICANTE DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE; B EM TESLA e H em Ae/m
%B_x_H=[ (0.20:0.01:1.87) ; 6.7 7.0 7.3 7.5 7.8 8.0 8.3 8.5 8.7 8.8 9.0 9.2 9.4 9.6 9.9
10.0 10.2 10.4 10.6 10.8 11.0 11.2 11.4 11.6 11.8 12.0 12.2 12.4 12.6 12.8 14.0 15.0 15.1
15.3 15.4 15.5 15.6 15.7 15.8 15.9 16.0 16.0 16.1 16.1 16.2 16.3 16.4 16.5 16.6 16.7 16.7
16.9 17.2 17.4 17.6 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.5 18.6 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0 19.0 19.1
19.1 19.2 19.3 19.4 19.4 19.5 19.6 19.7 19.8 19.9 20.0 20.5 21.0 21.2 21.4 21.8 22.0 22.1
22.2 22.3 22.5 22.7 22.9 23.0 23.1 23.3 23.4 23.5 23.6 23.7 23.8 23.9 24.0 24.3 24.6 24.9
25.2 25.4 25.9 26.0 26.3 26.8 27.0 27.3 27.6 27.9 29.2 29.6 29.8 30.0 30.5 30.7 31.0 31.5
32.0 33.0 34.0 35.0 36.0 37.0 38.6 40.0 40.6 41.8 43.0 45.0 46.0 48.0 49.0 50.0 55.0 60.0
65.0 74.0 86.0 93.0 107.0 115.0 124.0 136.0 141.0 146.0 150.0 185.0 225.0 260.0 300.0 335.0
375.0 395.0 435.0 470.0 500.0 570.0 640.0 760.0 850.0 932.0 960.0]

B_x_H=[ 0.20 0.21 0.22 0.23 0.24 0.25 0.26 0.27 0.28 0.29 0.30 0.31 0.32 0.33 0.34 0.35
0.36 0.37 0.38 0.39 0.40 0.41 0.42 0.43 0.44 0.45 0.46 0.47 0.48 0.49 0.50 0.51 0.52 0.53
0.54 0.55 0.56 0.57 0.58 0.59 0.60 0.61 0.62 0.63 0.64 0.65 0.66 0.67 0.68 0.69 0.70 0.71
0.72 0.73 0.74 0.75 0.76 0.77 0.78 0.79 0.80 0.81 0.82 0.83 0.84 0.85 0.86 0.87 0.88 0.89
0.90 0.91 0.92 0.93 0.94 0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.00 1.01 1.02 1.03 1.04 1.05 1.06 1.07
1.08 1.09 1.10 1.11 1.12 1.13 1.14 1.15 1.16 1.17 1.18 1.19 1.20 1.21 1.22 1.23 1.24 1.25
1.26 1.27 1.28 1.29 1.30 1.31 1.32 1.33 1.34 1.35 1.36 1.37 1.38 1.39 1.40 1.41 1.42 1.43
1.44 1.45 1.46 1.47 1.48 1.49 1.50 1.51 1.52 1.53 1.54 1.55 1.56 1.57 1.58 1.59 1.60 1.61
1.62 1.63 1.64 1.65 1.66 1.67 1.68 1.69 1.70 1.71 1.72 1.73 1.74 1.75 1.76 1.77 1.78 1.79
1.80 1.81 1.82 1.83 1.84 1.85 1.86 1.87 ; 6.7 7.0 7.3 7.5 7.8 8.0 8.3 8.5 8.7 8.8 9.0 9.2
9.4 9.6 9.9 10.1 10.2 10.4 10.6 10.8 11.0 11.2 11.4 11.6 11.8 12.0 12.2 12.4 12.6 12.8 14.0
15.0 15.1 15.3 15.4 15.5 15.6 15.7 15.8 15.9 16.0 16.0 16.1 16.1 16.2 16.3 16.4 16.5 16.6
16.7 16.7 16.9 17.2 17.4 17.6 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.5 18.6 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0
19.0 19.1 19.1 19.2 19.3 19.4 19.4 19.5 19.6 19.7 19.8 19.9 20.0 20.5 21.0 21.2 21.4 21.8
22.0 22.1 22.2 22.3 22.5 22.7 22.9 23.0 23.1 23.3 23.4 23.5 23.6 23.7 23.8 23.9 24.0 24.3
24.6 24.9 25.2 25.4 25.9 26.0 26.3 26.8 27.0 27.3 27.6 27.9 29.2 29.6 29.8 30.0 30.5 30.7
31.0 31.5 32.0 33.0 34.0 35.0 36.0 37.0 38.6 40.0 40.6 41.8 43.0 45.0 46.0 48.0 49.0 50.0
55.0 60.0 65.0 74.0 86.0 93.0 107.0 115.0 124.0 136.0 141.0 146.0 150.0 185.0 225.0 260.0
300.0 335.0 375.0 395.0 435.0 470.0 500.0 570.0 640.0 760.0 850.0 932.0 960.0]

C_B_x_H=length(B_x_H)

% 12. PESQUISANDO NA MATRIZ DE CARACTERÍSTICAS B x H DO FERRO DO NÚCLEO
% DO TC QUAIS OS VALORES DE H QUE CORRESPONDEM AOS VALORES DE B NO VETOR
% DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO
CBm=length(Bm) % identifica o número de colunas de Bm

```

```

for n=1:CBm; % localiza na primeira linha da matriz B_x_H em qual coluna k estão os ele-
mentos da matriz Bm
    k=find(B_x_H(1,:)==Bm(1,n)); % localiza na primeira linha da matriz B_x_H em qual
coluna k estão os elementos da matriz Bm
    y(n)=B_x_H(2,k); % Cria o vetor linha y com os elementos da 2ª linha de B_x_H que são
os respectivos correspondentes aos valores do vetor Bm

end

Hm=y % cria o vetor Hm correspondente aos valores de Bm calculados a partir das correntes
da memória de massa da UC

% 13. CALCULANDO A CORRENTE DE EXCITAÇÃO PARA CADA CORRENTE SECUNDÁRIA EM
% SEUS RESPECTIVOS INTERVALOS DE INTEGRALIZAÇÃO DA MEMÓRIA DE MASSA
Ie=(CAMMEDIO/N2)*Hm % calcula as correntes de excitação para cada corrente secundária da
memória de massa

% 14. CALCULANDO OS ERROS DE RELAÇÃO PARA CADA INTERVALO DE INTEGRALIZAÇÃO
% DA MEMÓRIA DE MASSA DE CORRENTES DA UNIDADE CONSUMIDORA
Itot=I2TC + Ie% calcula a corrente secundária somada à corrente de excitação em cada inter-
valo de integralização
erro_relacao= Ie./Itot

% 15. CALCULANDO AS CORRENTES PRIMÁRIAS CORRIGIDAS
I1TC=I2TC*N2 % calcula as correntes primárias intervalo a intervalo de integralização
I1TC_corrigida=I1TC+erro_relacao % corrige a corrente primária adicionando o erro de re-
lação

% 16. CALCULANDO A MATRIZ DE POTÊNCIAS (DEMANDAS) SEM CORRIGIR OS ERROS DO
% TC
E_nao_corrigida=I1TC.*V2fn.*COS_fi
E_nao_corrigida_tot=sum(E_nao_corrigida)
E_nao_corrigida_tot= E_nao_corrigida_tot/1000 % convertendo para kWh

% 16. CALCULANDO A MATRIZ DE POTÊNCIAS ( DEMANDAS ) CORRIGIDAS EM INTERVALO DE
% INTEGRALIZAÇÃO HORÁRIA
E_corrigida=I1TC_corrigida.*V2fn.*COS_fi
E_corrigida_tot=sum(E_corrigida)

formatbank
E_corrigida_tot=E_corrigida_tot/1000

%17. FORMATANDO OS RESULTADOS EM TABELA

Tabela = [ I2TC' V2fn' COS_fi'
I1TC_corrigida' E_nao_corrigida' E_corrigida' ];
disp(' ')
disp(' I_secV_sec Fat pot I1_corr Kwh_não_corrkWh_corr ')
disp(' ( A ) ( V ) ( pu ) ( A ) ( Wh ) ( Wh ) ')
disp(' ')
disp(Tabela)

fprintf( ' A energia corrigida para 7 dias de consumo é %f kWh. ' , E_corrigida_tot )

```

TELA DE SAÍDA COMMAND WINDOW TESTE TESE 2 QUE FUNCIONOU ATÉ A 168ª ITERAÇÃO PORTANTO FUNCIONOU TOTALMENTE PARA O INTERVALO DE CORRENTES ENTRE 3 AMPÉRES E 4 AMPÉRES NO SECUNDÁRIO DO TC.

I2TC =

Columns 1 through 11

3.83 3.63 3.54 3.65 3.73 3.09 3.88 3.01 3.29 3.18 3.93

Columns 12 through 22

3.07 3.58 3.64 3.65 3.86 3.06 3.82 3.53 3.69 3.21 3.54

Columns 23 through 33

3.70 3.96 3.44 3.09 3.06 3.63 3.80 3.69 3.35 3.95 3.52

Columns 34 through 44

3.95 3.07 3.21 3.78 3.91 3.78 3.30 3.15 3.85 3.78 3.27

Columns 45 through 55

3.23 3.32 3.83 3.82 3.57 3.57 3.29 3.70 3.80 3.44 3.45

Columns 56 through 66

3.47 3.28 3.68 3.90 3.91 3.75 3.26 3.69 3.13 3.12 3.19

Columns 67 through 77

3.15 3.59 3.07 3.82 3.72 3.93 3.49 3.65 3.89 3.54 3.28

Columns 78 through 88

3.98 3.04 3.33 3.97 3.37 3.31 3.12 3.92 3.14 3.33 3.90

Columns 89 through 99

3.50 3.62 3.58 3.70 3.03 3.53 3.03 3.83 3.34 3.85 3.25

Columns 100 through 110

3.58 3.94 3.05 3.05 3.02 3.68 3.60 3.11 3.80 3.62 3.07

Columns 111 through 121

3.07 3.14 3.79 3.09 3.24 3.24 3.10 3.86 3.70 3.73 3.65

Columns 122 through 132

3.52 3.33 3.66 3.12 3.15 3.02 3.96 3.97 3.12 3.47 3.66

Columns 133 through 143

3.29 3.75 3.56 3.43 3.27 3.75 3.90 3.73 3.41 3.94 3.26

Columns 144 through 154

3.53 3.95 3.27 3.25 3.93 3.07 3.30 3.59 3.20 3.64 3.80

Columns 155 through 165

3.50	3.65	3.80	3.23	3.60	3.11	3.52	3.84	3.92	3.50	3.28
Columns 166 through 168										
3.65	3.92	3.51								
C_I2TC =										
168.00										
V2fn =										
Columns 1 through 11										
220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00	220.00	217.00	217.00	217.00
Columns 12 through 22										
218.00	219.00	219.00	220.00	220.00	219.00	218.00	217.00	216.00	216.00	217.00
Columns 23 through 33										
217.00	218.00	220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00	220.00	217.00
Columns 34 through 44										
217.00	217.00	218.00	219.00	219.00	220.00	220.00	219.00	218.00	217.00	216.00
Columns 45 through 55										
216.00	217.00	217.00	218.00	220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00
Columns 56 through 66										
220.00	217.00	217.00	217.00	218.00	219.00	219.00	220.00	220.00	219.00	218.00
Columns 67 through 77										
217.00	216.00	216.00	217.00	217.00	218.00	220.00	221.00	220.00	219.00	219.00
Columns 78 through 88										
218.00	219.00	220.00	217.00	217.00	217.00	218.00	219.00	219.00	220.00	220.00
Columns 89 through 99										
219.00	218.00	217.00	216.00	216.00	217.00	217.00	218.00	220.00	221.00	220.00
Columns 100 through 110										
219.00	219.00	218.00	219.00	220.00	217.00	217.00	217.00	218.00	219.00	219.00
Columns 111 through 121										
220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00	220.00	217.00	217.00	217.00
Columns 122 through 132										
218.00	219.00	219.00	220.00	220.00	219.00	218.00	217.00	216.00	216.00	217.00
Columns 133 through 143										
217.00	218.00	220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00	220.00	217.00
Columns 144 through 154										
217.00	217.00	218.00	219.00	219.00	220.00	220.00	219.00	218.00	217.00	216.00
Columns 155 through 165										
216.00	217.00	217.00	218.00	220.00	221.00	220.00	219.00	219.00	218.00	219.00

Columns 166 through 168

220.00 217.00 217.00

C_V2fn =

168.00

COS_fi =

Columns 1 through 11

0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95

Columns 12 through 22

0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90

Columns 23 through 33

0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80

Columns 34 through 44

0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90

Columns 45 through 55

0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80

Columns 56 through 66

0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90

Columns 67 through 77

0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80

Columns 78 through 88

0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95

Columns 89 through 99

0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80

Columns 100 through 110

0.80 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95

Columns 111 through 121

0.95 0.95 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90

Columns 122 through 132

0.90 0.90 0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95

Columns 133 through 143

0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.90 0.90 0.90

Columns 144 through 154

0.90 0.90 0.90 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.95 0.80 0.80

Columns 155 through 165

0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.80 0.92 0.92 0.92 0.92 0.92

Columns 166 through 168

0.92 0.92 0.92

C_COS_fi =

168.00

Entre com STC, a disponibiidade de potência aparente do TC em VA30
 Entre com COSFISTC, o fator de potência da STC do transformador de corrente0.8
 Entre com R2, a resistência das espiras secundárias do TC 0.2
 Entre com ATC, a área transversal do caminho magnético do TC0.0006
 Entre com N2, o número de espiras secundárias do TC120
 Entre com DIAMTC, o diâetro médio do transformador de corrente0.1

CAMMEDIO =

0.31

MODZB =

1.20

FISTC =

36.87

REALZB =

0.96

IMAGZB =

0.72

ZFB =

1.16

ANGZFB =

0.56

E2 =

Columns 1 through 11

5.23 4.95 4.83 4.98 5.09 4.22 5.29 4.12 4.50 4.34 5.36

Columns 12 through 22

4.19 4.89 4.97 4.99 5.28 4.17 5.21 4.82 5.04 4.39 4.84

Columns 23 through 33

5.05 5.40 4.70 4.21 4.17 4.96 5.18 5.04 4.57 5.39 4.81

Columns 34 through 44

5.40 4.20 4.38 5.15 5.34 5.16 4.50 4.30 5.25 5.17 4.47

Columns 45 through 55

4.41 4.53 5.23 5.22 4.87 4.88 4.49 5.05 5.18 4.70 4.71

Columns 56 through 66

4.73 4.48 5.02 5.33 5.34 5.12 4.45 5.04 4.28 4.26 4.36

Columns 67 through 77

4.29 4.89 4.20 5.22 5.08 5.36 4.77 4.99 5.31 4.83 4.48

Columns 78 through 88

5.43 4.15 4.54 5.42 4.59 4.52 4.26 5.35 4.28 4.55 5.32

Columns 89 through 99

4.78 4.94 4.89 5.05 4.14 4.82 4.14 5.23 4.56 5.25 4.43

Columns 100 through 110

4.89 5.38 4.16 4.17 4.12 5.03 4.91 4.25 5.18 4.94 4.19

Columns 111 through 121

4.19 4.28 5.17 4.22 4.42 4.43 4.24 5.27 5.05 5.10 4.98

Columns 122 through 132

4.80 4.54 5.00 4.26 4.30 4.12 5.41 5.42 4.26 4.73 4.99

Columns 133 through 143

4.49 5.13 4.86 4.68 4.46 5.12 5.32 5.09 4.65 5.38 4.44

Columns 144 through 154

4.82 5.40 4.46 4.44 5.36 4.19 4.50 4.90 4.37 4.96 5.19

Columns 155 through 165

4.78 4.98 5.18 4.41 4.92 4.25 4.80 5.24 5.35 4.78 4.47

Columns 166 through 168

4.99 5.35 4.79

Bm =

Columns 1 through 11

0.27 0.26 0.25 0.26 0.27 0.22 0.28 0.21 0.23 0.23 0.28

Columns 12 through 22

0.22 0.25 0.26 0.26 0.28 0.22 0.27 0.25 0.26 0.23 0.25

Columns 23 through 33

0.26 0.28 0.25 0.22 0.22 0.26 0.27 0.26 0.24 0.28 0.25

Columns 34 through 44

0.28 0.22 0.23 0.27 0.28 0.27 0.23 0.22 0.27 0.27 0.23

Columns 45 through 55

0.23 0.24 0.27 0.27 0.25 0.25 0.23 0.26 0.27 0.24 0.25

Columns 56 through 66

0.25 0.23 0.26 0.28 0.28 0.27 0.23 0.26 0.22 0.22 0.23

Columns 67 through 77

0.22 0.26 0.22 0.27 0.26 0.28 0.25 0.26 0.28 0.25 0.23

Columns 78 through 88

0.28	0.22	0.24	0.28	0.24	0.24	0.22	0.28	0.22	0.24	0.28
Columns 89 through 99										
0.25	0.26	0.26	0.26	0.22	0.25	0.22	0.27	0.24	0.27	0.23
Columns 100 through 110										
0.25	0.28	0.22	0.22	0.22	0.26	0.26	0.22	0.27	0.26	0.22
Columns 111 through 121										
0.22	0.22	0.27	0.22	0.23	0.23	0.22	0.27	0.26	0.27	0.26
Columns 122 through 132										
0.25	0.24	0.26	0.22	0.22	0.21	0.28	0.28	0.22	0.25	0.26
Columns 133 through 143										
0.23	0.27	0.25	0.24	0.23	0.27	0.28	0.27	0.24	0.28	0.23
Columns 144 through 154										
0.25	0.28	0.23	0.23	0.28	0.22	0.23	0.26	0.23	0.26	0.27
Columns 155 through 165										
0.25	0.26	0.27	0.23	0.26	0.22	0.25	0.27	0.28	0.25	0.23
Columns 166 through 168										
0.26	0.28	0.25								
Bm =										
Columns 1 through 11										
0.27	0.26	0.25	0.26	0.27	0.22	0.28	0.21	0.23	0.23	0.28
Columns 12 through 22										
0.22	0.25	0.26	0.26	0.28	0.22	0.27	0.25	0.26	0.23	0.25
Columns 23 through 33										
0.26	0.28	0.25	0.22	0.22	0.26	0.27	0.26	0.24	0.28	0.25
Columns 34 through 44										
0.28	0.22	0.23	0.27	0.28	0.27	0.23	0.22	0.27	0.27	0.23
Columns 45 through 55										
0.23	0.24	0.27	0.27	0.25	0.25	0.23	0.26	0.27	0.24	0.25
Columns 56 through 66										
0.25	0.23	0.26	0.28	0.28	0.27	0.23	0.26	0.22	0.22	0.23
Columns 67 through 77										
0.22	0.26	0.22	0.27	0.26	0.28	0.25	0.26	0.28	0.25	0.23
Columns 78 through 88										
0.28	0.22	0.24	0.28	0.24	0.24	0.22	0.28	0.22	0.24	0.28
Columns 89 through 99										
0.25	0.26	0.26	0.26	0.22	0.25	0.22	0.27	0.24	0.27	0.23
Columns 100 through 110										

0.25	0.28	0.22	0.22	0.22	0.26	0.26	0.22	0.27	0.26	0.22
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 111 through 121

0.22	0.22	0.27	0.22	0.23	0.23	0.22	0.27	0.26	0.27	0.26
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 122 through 132

0.25	0.24	0.26	0.22	0.22	0.21	0.28	0.28	0.22	0.25	0.26
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 133 through 143

0.23	0.27	0.25	0.24	0.23	0.27	0.28	0.27	0.24	0.28	0.23
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 144 through 154

0.25	0.28	0.23	0.23	0.28	0.22	0.23	0.26	0.23	0.26	0.27
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 155 through 165

0.25	0.26	0.27	0.23	0.26	0.22	0.25	0.27	0.28	0.25	0.23
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 166 through 168

0.26	0.28	0.25
------	------	------

B_x_H =

Columns 1 through 11

0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30
6.70	7.00	7.30	7.50	7.80	8.00	8.30	8.50	8.70	8.80	9.00

Columns 12 through 22

0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41
9.20	9.40	9.60	9.90	10.10	10.20	10.40	10.60	10.80	11.00	11.20

Columns 23 through 33

0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52
11.40	11.60	11.80	12.00	12.20	12.40	12.60	12.80	14.00	15.00	15.10

Columns 34 through 44

0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63
15.30	15.40	15.50	15.60	15.70	15.80	15.90	16.00	16.00	16.10	16.10

Columns 45 through 55

0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74
16.20	16.30	16.40	16.50	16.60	16.70	16.70	16.90	17.20	17.40	17.60

Columns 56 through 66

0.75	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85
17.90	18.00	18.10	18.20	18.30	18.50	18.60	18.60	18.70	18.80	18.90

Columns 67 through 77

0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
19.00	19.00	19.10	19.10	19.20	19.30	19.40	19.40	19.50	19.60	19.70

Columns 78 through 88

0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07
19.80	19.90	20.00	20.50	21.00	21.20	21.40	21.80	22.00	22.10	22.20

Columns 89 through 99

1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18
22.30	22.50	22.70	22.90	23.00	23.10	23.30	23.40	23.50	23.60	23.70

Columns 100 through 110

1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29
23.80	23.90	24.00	24.30	24.60	24.90	25.20	25.40	25.90	26.00	26.30

Columns 111 through 121

1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40
26.80	27.00	27.30	27.60	27.90	29.20	29.60	29.80	30.00	30.50	30.70

Columns 122 through 132

1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.50	1.51
31.00	31.50	32.00	33.00	34.00	35.00	36.00	37.00	38.60	40.00	40.60

Columns 133 through 143

1.52	1.53	1.54	1.55	1.56	1.57	1.58	1.59	1.60	1.61	1.62
41.80	43.00	45.00	46.00	48.00	49.00	50.00	55.00	60.00	65.00	74.00

Columns 144 through 154

1.63	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73
86.00	93.00	107.00	115.00	124.00	136.00	141.00	146.00	150.00	185.00	225.00

Columns 155 through 165

1.74	1.75	1.76	1.77	1.78	1.79	1.80	1.81	1.82	1.83	1.84
260.00	300.00	335.00	375.00	395.00	435.00	470.00	500.00	570.00	640.00	760.00

Columns 166 through 168

1.85	1.86	1.87
850.00	932.00	960.00

C_B_x_H =

168.00

CBm =

168.00

Hm =

Columns 1 through 11

8.50	8.30	8.00	8.30	8.50	7.30	8.70	7.00	7.50	7.50	8.70
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 12 through 22

7.30	8.00	8.30	8.30	8.70	7.30	8.50	8.00	8.30	7.50	8.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 23 through 33

8.30	8.70	8.00	7.30	7.30	8.30	8.50	8.30	7.80	8.70	8.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 34 through 44

8.70	7.30	7.50	8.50	8.70	8.50	7.50	7.30	8.50	8.50	7.50
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 45 through 55

7.50	7.80	8.50	8.50	8.00	8.00	7.50	8.30	8.50	7.80	8.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 56 through 66

8.00	7.50	8.30	8.70	8.70	8.50	7.50	8.30	7.30	7.30	7.50
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Columns 67 through 77

Columns 89 through 99

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 100 through 110

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 111 through 121

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 122 through 132

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 133 through 143

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 144 through 154

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 155 through 165

0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02

Columns 166 through 168

0.02 0.02 0.02

Itot =

Columns 1 through 11

3.85 3.65 3.56 3.67 3.75 3.11 3.90 3.03 3.31 3.20 3.95

Columns 12 through 22

3.09 3.60 3.66 3.67 3.89 3.08 3.84 3.55 3.72 3.23 3.56

Columns 23 through 33

3.72 3.98 3.47 3.10 3.08 3.65 3.82 3.71 3.37 3.97 3.54

Columns 34 through 44

3.98 3.09 3.23 3.80 3.94 3.80 3.32 3.17 3.87 3.81 3.29

Columns 45 through 55

3.25 3.34 3.85 3.84 3.59 3.59 3.31 3.72 3.82 3.46 3.47

Columns 56 through 66

3.49 3.30 3.70 3.93 3.93 3.77 3.28 3.71 3.15 3.14 3.21

Columns 67 through 77

3.16 3.61 3.09 3.84 3.74 3.95 3.51 3.68 3.91 3.56 3.30

Columns 78 through 88

4.00 3.06 3.35 4.00 3.39 3.33 3.14 3.94 3.15 3.35 3.92

Columns 89 through 99

3.52 3.64 3.60 3.72 3.05 3.55 3.05 3.85 3.36 3.87 3.27

Columns 100 through 110

3.60 3.96 3.07 3.07 3.04 3.70 3.62 3.13 3.82 3.64 3.09

Columns 111 through 121

3.09 3.16 3.81 3.11 3.26 3.26 3.12 3.88 3.72 3.76 3.67

Columns 122 through 132

3.54 3.35 3.68 3.14 3.17 3.04 3.99 3.99 3.14 3.49 3.68

Columns 133 through 143

3.31 3.78 3.58 3.45 3.29 3.78 3.92 3.75 3.43 3.96 3.28

Columns 144 through 154

3.55 3.98 3.29 3.27 3.95 3.09 3.32 3.61 3.22 3.66 3.82

Columns 155 through 165

3.52 3.67 3.82 3.25 3.62 3.13 3.54 3.86 3.94 3.52 3.30

Columns 166 through 168

3.67 3.94 3.53

erro_relacao =

Columns 1 through 11

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 12 through 22

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 23 through 33

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 34 through 44

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 45 through 55

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 56 through 66

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 67 through 77

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 78 through 88

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 89 through 99

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 100 through 110

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 111 through 121

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

Columns 122 through 132

0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Columns 133 through 143										
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Columns 144 through 154										
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Columns 155 through 165										
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Columns 166 through 168										
0.01	0.01	0.01								
IITC =										
Columns 1 through 11										
459.49	435.19	424.65	438.06	447.20	371.34	465.31	361.72	395.32	381.59	471.16
Columns 12 through 22										
368.18	429.73	436.46	438.15	463.75	366.71	458.02	423.47	443.32	385.49	425.19
Columns 23 through 33										
444.30	474.77	413.35	370.25	366.88	435.53	455.54	442.94	401.44	473.62	422.42
Columns 34 through 44										
474.46	368.83	384.84	453.00	469.70	453.91	395.46	378.22	461.75	454.18	392.50
Columns 45 through 55										
387.34	398.52	459.55	458.66	428.48	428.62	394.32	443.90	455.55	412.99	413.55
Columns 56 through 66										
415.88	393.48	441.05	468.44	469.02	449.66	391.26	442.76	375.82	374.82	382.91
Columns 67 through 77										
377.49	430.21	368.80	458.68	446.75	471.10	419.12	438.59	466.81	424.62	393.86
Columns 78 through 88										
477.11	364.37	399.15	476.76	403.80	397.10	374.51	469.89	376.26	399.85	467.70
Columns 89 through 99										
419.96	433.83	429.98	443.79	363.52	423.35	363.85	459.26	400.80	461.61	389.53
Columns 100 through 110										
429.78	472.52	365.73	366.48	362.47	441.78	431.84	373.68	455.55	434.14	368.43
Columns 111 through 121										
368.31	376.32	454.67	371.09	388.54	389.24	372.58	463.00	443.78	448.05	438.06
Columns 122 through 132										
421.95	399.17	439.41	374.11	377.74	362.37	475.72	476.44	374.86	416.09	438.80
Columns 133 through 143										
394.82	450.54	426.97	411.34	392.06	450.45	467.81	447.41	408.82	472.60	390.65
Columns 144 through 154										

423.98	474.57	392.13	390.01	471.32	368.23	395.93	430.99	384.40	436.31	455.80
Columns 155 through 165										
420.20	438.10	455.51	388.00	432.10	373.50	421.89	460.54	470.49	419.79	393.31
Columns 166 through 168										
438.30	470.08	421.18								
I1TC_corrigida =										
Columns 1 through 11										
459.49	435.20	424.66	438.07	447.20	371.34	465.31	361.73	395.32	381.60	471.16
Columns 12 through 22										
368.19	429.74	436.46	438.16	463.76	366.72	458.03	423.48	443.33	385.49	425.20
Columns 23 through 33										
444.31	474.78	413.35	370.25	366.89	435.54	455.55	442.95	401.44	473.62	422.43
Columns 34 through 44										
474.46	368.84	384.85	453.01	469.71	453.91	395.47	378.23	461.76	454.19	392.51
Columns 45 through 55										
387.34	398.53	459.55	458.67	428.49	428.63	394.33	443.90	455.56	413.00	413.55
Columns 56 through 66										
415.89	393.49	441.05	468.45	469.03	449.67	391.27	442.76	375.83	374.83	382.91
Columns 67 through 77										
377.49	430.21	368.81	458.68	446.75	471.11	419.12	438.59	466.82	424.63	393.87
Columns 78 through 88										
477.12	364.38	399.16	476.77	403.81	397.10	374.52	469.90	376.26	399.86	467.70
Columns 89 through 99										
419.96	433.84	429.98	443.80	363.53	423.35	363.86	459.26	400.80	461.61	389.53
Columns 100 through 110										
429.78	472.53	365.74	366.48	362.48	441.78	431.84	373.69	455.56	434.15	368.43
Columns 111 through 121										
368.32	376.33	454.67	371.09	388.55	389.24	372.58	463.01	443.79	448.05	438.07
Columns 122 through 132										
421.96	399.17	439.42	374.11	377.74	362.38	475.72	476.45	374.87	416.10	438.81
Columns 133 through 143										
394.83	450.55	426.98	411.34	392.07	450.45	467.81	447.42	408.83	472.60	390.66
Columns 144 through 154										
423.99	474.58	392.14	390.02	471.33	368.24	395.93	431.00	384.40	436.31	455.81
Columns 155 through 165										
420.21	438.10	455.52	388.01	432.11	373.50	421.90	460.55	470.50	419.79	393.32

Columns 166 through 168

438.31 470.08 421.19

E_nao_corrigida =

Columns 1 through 11

90978.37 86559.47 84080.62 86341.81 88142.24 72856.64 96807.51 75600.20 81494.46 78664.73 97128.67

Columns 12 through 22

76250.42 75288.90 76467.47 77114.81 81620.82 64248.35 79879.15 73514.51 76606.05 74938.98
83040.31

Columns 23 through 33

86772.27 93150.30 81842.32 73642.28 76678.09 90612.86 94775.41 91733.49 83518.96 98986.16
73332.60

Columns 34 through 44

82365.83 64029.14 67116.76 79366.18 82291.88 79887.47 69601.68 74547.46 90595.21 88701.85
76301.96

Columns 45 through 55

75298.37 77831.50 94735.70 94988.87 89552.73 89988.68 82413.34 92352.57 79812.53 72025.58
72453.24

Columns 56 through 66

73194.79 68308.94 76565.42 81321.14 81797.63 88628.70 77117.62 87665.80 74412.30 73877.04
75126.62

Columns 67 through 77

77819.12 88278.11 75678.46 94556.71 92097.17 97565.42 73764.53 77542.00 82159.41 74393.96
69005.08

Columns 78 through 88

83208.84 63837.81 70250.29 93111.55 78862.90 77553.23 73478.76 92615.69 74160.33 83569.52
97748.80

Columns 89 through 99

87372.23 89847.14 88639.54 91065.80 62816.24 73492.85 63164.14 80094.43 70540.51 81611.82
68556.99

Columns 100 through 110

75297.27 93133.93 71757.10 72232.68 71769.88 86279.13 84337.46 77034.87 94344.29 90323.26
76650.95

Columns 111 through 121

76977.52 79008.57 80021.38 65014.59 68072.95 67883.06 65275.78 81488.41 77040.90 77781.32
85553.84

Columns 122 through 132

82787.07 78675.73 86608.33 74073.36 74792.14 75391.44 98520.58 98219.08 76921.94 85381.50
90459.30

Columns 133 through 143

68541.15 78574.94 75147.45 72724.05 69003.14 78918.55 81959.46 78028.88 80578.35 93574.38
76294.20

Columns 144 through 154

82803.21	92683.64	76935.85	81141.61	98058.28	76960.05	82748.96	89667.47	79608.39	75742.72
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

78763.01

Columns 155 through 165

72611.27	76053.72	79077.33	67668.05	76049.72	66034.00	85390.92	92789.78	94795.29	84192.55
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

79244.77

Columns 166 through 168

88712.40 93845.94 84084.52

E_nao_corrigida_tot =

13553520.74

E_nao_corrigida_tot =

13553.52

E_corrigida =

Columns 1 through 11

90979.51	86560.66	84081.78	86342.97	88143.41	72857.84	96808.73	75601.47	81495.68	78666.00
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

97129.86

Columns 12 through 22

76251.70	75289.92	76468.51	77115.85	81621.85	64249.43	79880.16	73515.54	76607.06	74940.16
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

83041.46

Columns 23 through 33

86773.40	93151.42	81843.52	73643.50	76679.39	90614.10	94776.62	91734.70	83520.22	98987.36
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

73333.63

Columns 34 through 44

82366.83	64030.22	67117.83	79367.21	82292.90	79888.50	69602.72	74548.64	90596.33	88702.99
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

76303.12

Columns 45 through 55

75299.54	77832.69	94736.89	94990.07	89553.94	89989.90	82414.58	92353.78	79813.55	72026.60
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

72454.30

Columns 56 through 66

73195.85	68309.98	76566.44	81322.15	81798.64	88629.87	77118.80	87666.95	74413.50	73878.24
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

75127.82

Columns 67 through 77

77820.37	88279.35	75679.73	94557.90	92098.37	97566.62	73765.58	77543.04	82160.43	74394.99
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

69006.12

Columns 78 through 88

83209.83	63838.91	70251.36	93112.66	78864.08	77554.43	73479.96	92616.83	74161.52	83570.79
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

97750.01

Columns 89 through 99

87373.47	89848.38	88640.79	91067.00	62817.32	73493.88	63165.23	80095.44	70541.58	81612.84
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

68558.05

Columns 100 through 110

75298.29	93135.07	71758.33	72233.91	71771.13	86280.28	84338.63	77036.13	94345.50	90324.50
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

76652.24

Columns 111 through 121

76978.81 79009.84 80022.41 65015.66 68074.01 67884.11 65276.85 81489.42 77041.91 77782.34
85554.99

Columns 122 through 132

82788.24 78676.93 86609.49 74074.56 74793.34 75392.70 98521.76 98220.26 76923.19 85382.74
90460.51

Columns 133 through 143

68542.18 78575.97 75148.48 72725.09 69004.19 78919.58 81960.48 78029.91 80579.52 93575.52
76295.37

Columns 144 through 154

82804.36 92684.75 76937.02 81142.86 98059.48 76961.34 82750.20 89668.73 79609.65 75743.75
78764.01

Columns 155 through 165

72612.30 76054.75 79078.35 67669.10 76050.77 66035.08 85392.11 92790.94 94796.46 84193.74
79245.97

Columns 166 through 168

88713.60 93847.10 84085.71

E_corrigeida_tot =

13553712.13

E_corrigeida_tot =

13553.71

I_sec	V_sec	Fat pot	I1_corr	Kwh_não_corr	Wh_corr
(A)	(V)	(pu)	(A)	(Wh)	(Wh)
3.83	220.00	0.90	459.49	90978.37	90979.51
3.63	221.00	0.90	435.20	86559.47	86560.66
3.54	220.00	0.90	424.66	84080.62	84081.78
3.65	219.00	0.90	438.07	86341.81	86342.97
3.73	219.00	0.90	447.20	88142.24	88143.41
3.09	218.00	0.90	371.34	72856.64	72857.84
3.88	219.00	0.95	465.31	96807.51	96808.73
3.01	220.00	0.95	361.73	75600.20	75601.47
3.29	217.00	0.95	395.32	81494.46	81495.68
3.18	217.00	0.95	381.60	78664.73	78666.00
3.93	217.00	0.95	471.16	97128.67	97129.86
3.07	218.00	0.95	368.19	76250.42	76251.70
3.58	219.00	0.80	429.74	75288.90	75289.92
3.64	219.00	0.80	436.46	76467.47	76468.51
3.65	220.00	0.80	438.16	77114.81	77115.85
3.86	220.00	0.80	463.76	81620.82	81621.85
3.06	219.00	0.80	366.72	64248.35	64249.43
3.82	218.00	0.80	458.03	79879.15	79880.16
3.53	217.00	0.80	423.48	73514.51	73515.54
3.69	216.00	0.80	443.33	76606.05	76607.06
3.21	216.00	0.90	385.49	74938.98	74940.16
3.54	217.00	0.90	425.20	83040.31	83041.46
3.70	217.00	0.90	444.31	86772.27	86773.40
3.96	218.00	0.90	474.78	93150.30	93151.42
3.44	220.00	0.90	413.35	81842.32	81843.52
3.09	221.00	0.90	370.25	73642.28	73643.50
3.06	220.00	0.95	366.89	76678.09	76679.39
3.63	219.00	0.95	435.54	90612.86	90614.10
3.80	219.00	0.95	455.55	94775.41	94776.62
3.69	218.00	0.95	442.95	91733.49	91734.70

3.35	219.00	0.95	401.44	83518.96	83520.22
3.95	220.00	0.95	473.62	98986.16	98987.36
3.52	217.00	0.80	422.43	73332.60	73333.63
3.95	217.00	0.80	474.46	82365.83	82366.83
3.07	217.00	0.80	368.84	64029.14	64030.22
3.21	218.00	0.80	384.85	67116.76	67117.83
3.78	219.00	0.80	453.01	79366.18	79367.21
3.91	219.00	0.80	469.71	82291.88	82292.90
3.78	220.00	0.80	453.91	79887.47	79888.50
3.30	220.00	0.80	395.47	69601.68	69602.72
3.15	219.00	0.90	378.23	74547.46	74548.64
3.85	218.00	0.90	461.76	90595.21	90596.33
3.78	217.00	0.90	454.19	88701.85	88702.99
3.27	216.00	0.90	392.51	76301.96	76303.12
3.23	216.00	0.90	387.34	75298.37	75299.54
3.32	217.00	0.90	398.53	77831.50	77832.69
3.83	217.00	0.95	459.55	94735.70	94736.89
3.82	218.00	0.95	458.67	94988.87	94990.07
3.57	220.00	0.95	428.49	89552.73	89553.94
3.57	221.00	0.95	428.63	89988.68	89989.90
3.29	220.00	0.95	394.33	82413.34	82414.58
3.70	219.00	0.95	443.90	92352.57	92353.78
3.80	219.00	0.80	455.56	79812.53	79813.55
3.44	218.00	0.80	413.00	72025.58	72026.60
3.45	219.00	0.80	413.55	72453.24	72454.30
3.47	220.00	0.80	415.89	73194.79	73195.85
3.28	217.00	0.80	393.49	68308.94	68309.98
3.68	217.00	0.80	441.05	76565.42	76566.44
3.90	217.00	0.80	468.45	81321.14	81322.15
3.91	218.00	0.80	469.03	81797.63	81798.64
3.75	219.00	0.90	449.67	88628.70	88629.87
3.26	219.00	0.90	391.27	77117.62	77118.80
3.69	220.00	0.90	442.76	87665.80	87666.95
3.13	220.00	0.90	375.83	74412.30	74413.50
3.12	219.00	0.90	374.83	73877.04	73878.24
3.19	218.00	0.90	382.91	75126.62	75127.82
3.15	217.00	0.95	377.49	77819.12	77820.37
3.59	216.00	0.95	430.21	88278.11	88279.35
3.07	216.00	0.95	368.81	75678.46	75679.73
3.82	217.00	0.95	458.68	94556.71	94557.90
3.72	217.00	0.95	446.75	92097.17	92098.37
3.93	218.00	0.95	471.11	97565.42	97566.62
3.49	220.00	0.80	419.12	73764.53	73765.58
3.65	221.00	0.80	438.59	77542.00	77543.04
3.89	220.00	0.80	466.82	82159.41	82160.43
3.54	219.00	0.80	424.63	74393.96	74394.99
3.28	219.00	0.80	393.87	69005.08	69006.12
3.98	218.00	0.80	477.12	83208.84	83209.83
3.04	219.00	0.80	364.38	63837.81	63838.91
3.33	220.00	0.80	399.16	70250.29	70251.36
3.97	217.00	0.90	476.77	93111.55	93112.66
3.37	217.00	0.90	403.81	78862.90	78864.08
3.31	217.00	0.90	397.10	77553.23	77554.43
3.12	218.00	0.90	374.52	73478.76	73479.96
3.92	219.00	0.90	469.90	92615.69	92616.83
3.14	219.00	0.90	376.26	74160.33	74161.52
3.33	220.00	0.95	399.86	83569.52	83570.79
3.90	220.00	0.95	467.70	97748.80	97750.01
3.50	219.00	0.95	419.96	87372.23	87373.47
3.62	218.00	0.95	433.84	89847.14	89848.38
3.58	217.00	0.95	429.98	88639.54	88640.79
3.70	216.00	0.95	443.80	91065.80	91067.00
3.03	216.00	0.80	363.53	62816.24	62817.32
3.53	217.00	0.80	423.35	73492.85	73493.88
3.03	217.00	0.80	363.86	63164.14	63165.23
3.83	218.00	0.80	459.26	80094.43	80095.44
3.34	220.00	0.80	400.80	70540.51	70541.58
3.85	221.00	0.80	461.61	81611.82	81612.84
3.25	220.00	0.80	389.53	68556.99	68558.05
3.58	219.00	0.80	429.78	75297.27	75298.29
3.94	219.00	0.90	472.53	93133.93	93135.07
3.05	218.00	0.90	365.74	71757.10	71758.33
3.05	219.00	0.90	366.48	72232.68	72233.91
3.02	220.00	0.90	362.48	71769.88	71771.13

3.68	217.00	0.90	441.78	86279.13	86280.28
3.60	217.00	0.90	431.84	84337.46	84338.63
3.11	217.00	0.95	373.69	77034.87	77036.13
3.80	218.00	0.95	455.56	94344.29	94345.50
3.62	219.00	0.95	434.15	90323.26	90324.50
3.07	219.00	0.95	368.43	76650.95	76652.24
3.07	220.00	0.95	368.32	76977.52	76978.81
3.14	221.00	0.95	376.33	79008.57	79009.84
3.79	220.00	0.80	454.67	80021.38	80022.41
3.09	219.00	0.80	371.09	65014.59	65015.66
3.24	219.00	0.80	388.55	68072.95	68074.01
3.24	218.00	0.80	389.24	67883.06	67884.11
3.10	219.00	0.80	372.58	65275.78	65276.85
3.86	220.00	0.80	463.01	81488.41	81489.42
3.70	217.00	0.80	443.79	77040.90	77041.91
3.73	217.00	0.80	448.05	77781.32	77782.34
3.65	217.00	0.90	438.07	85553.84	85554.99
3.52	218.00	0.90	421.96	82787.07	82788.24
3.33	219.00	0.90	399.17	78675.73	78676.93
3.66	219.00	0.90	439.42	86608.33	86609.49
3.12	220.00	0.90	374.11	74073.36	74074.56
3.15	220.00	0.90	377.74	74792.14	74793.34
3.02	219.00	0.95	362.38	75391.44	75392.70
3.96	218.00	0.95	475.72	98520.58	98521.76
3.97	217.00	0.95	476.45	98219.08	98220.26
3.12	216.00	0.95	374.87	76921.94	76923.19
3.47	216.00	0.95	416.10	85381.50	85382.74
3.66	217.00	0.95	438.81	90459.30	90460.51
3.29	217.00	0.80	394.83	68541.15	68542.18
3.75	218.00	0.80	450.55	78574.94	78575.97
3.56	220.00	0.80	426.98	75147.45	75148.48
3.43	221.00	0.80	411.34	72724.05	72725.09
3.27	220.00	0.80	392.07	69003.14	69004.19
3.75	219.00	0.80	450.45	78918.55	78919.58
3.90	219.00	0.80	467.81	81959.46	81960.48
3.73	218.00	0.80	447.42	78028.88	78029.91
3.41	219.00	0.90	408.83	80578.35	80579.52
3.94	220.00	0.90	472.60	93574.38	93575.52
3.26	217.00	0.90	390.66	76294.20	76295.37
3.53	217.00	0.90	423.99	82803.21	82804.36
3.95	217.00	0.90	474.58	92683.64	92684.75
3.27	218.00	0.90	392.14	76935.85	76937.02
3.25	219.00	0.95	390.02	81141.61	81142.86
3.93	219.00	0.95	471.33	98058.28	98059.48
3.07	220.00	0.95	368.24	76960.05	76961.34
3.30	220.00	0.95	395.93	82748.96	82750.20
3.59	219.00	0.95	431.00	89667.47	89668.73
3.20	218.00	0.95	384.40	79608.39	79609.65
3.64	217.00	0.80	436.31	75742.72	75743.75
3.80	216.00	0.80	455.81	78763.01	78764.01
3.50	216.00	0.80	420.21	72611.27	72612.30
3.65	217.00	0.80	438.10	76053.72	76054.75
3.80	217.00	0.80	455.52	79077.33	79078.35
3.23	218.00	0.80	388.01	67668.05	67669.10
3.60	220.00	0.80	432.11	76049.72	76050.77
3.11	221.00	0.80	373.50	66034.00	66035.08
3.52	220.00	0.92	421.90	85390.92	85392.11
3.84	219.00	0.92	460.55	92789.78	92790.94
3.92	219.00	0.92	470.50	94795.29	94796.46
3.50	218.00	0.92	419.79	84192.55	84193.74
3.28	219.00	0.92	393.32	79244.77	79245.97
3.65	220.00	0.92	438.31	88712.40	88713.60
3.92	217.00	0.92	470.08	93845.94	93847.10
3.51	217.00	0.92	421.19	84084.52	84085.71

A energia corrigida para 7 dias de consumo é 13553.712132 kWh. >>

Anexo

Termos e definições de interesse. ABNT NBR 6856:2015

As antigas normas brasileiras ABNT NBR 6856:1992 intituladas “Transformador de Corrente – especificação” e ABNT NBR 6821:1992 intitulada “Transformador de Corrente – método de ensaio” foram revogadas no ano 2015 e substituídas pela norma brasileira ABNT NBR 6856:2015 intitulada “Transformador de Corrente – Especificação e ensaios”. Destaco que no prefácio da norma edição 2015 existe apenas a referência que esteja cancelando e substituindo a edição anterior da ABNT NBR 6856:1992, não fazendo expressa referência à norma ABNT NBR 6821:1992, não obstante na prática, observa-se que substitui e unifica ambas uma vez que abrange ambos os temas especificação e ensaios. Observa-se também no site ABNT que a norma 6821 encontra-se com o carimbo de cancelada, o que corrobora nossa tese neste aspecto.

Outro ponto a destacar é que esta norma NBR ABNT 6856:2015 tem forte influência da norma internacional IEC 60044-1:2003 intitulada “Instrument Transformers – part 1 current transformers”.

Os termos e definições necessários para a compreensão das disposições da norma e o entendimento de transformadores de corrente, encontram-se nos capítulos iniciais de ambas normas nacional e internacional, e aqui estão sendo reproduzidas na versão NBR ABNT 6856:2015, apenas no subuniverso de definições que se coadunam com a necessidade do entendimento geral de transformadores de corrente e no subuniverso específico referente ao tratamento da solução relacionada ao tema estudado nesta tese. Estão sendo referenciados junto a cada termo e/ou definição o mesmo número do item, de forma idêntica ao que se encontra na norma.

3. Termos e definições

3.1. De transformadores de corrente

3.1.1. Ângulo de fase.

Diferença de fase entre os fasores da corrente primária e da corrente secundária, cuja direção dos fasores é escolhida de forma que o ângulo seja zero para um transformador ideal. Este ângulo é convencionalmente designado pela letra grega “beta” (β) e é considerado positivo quando o fasor da corrente secundária está adiantado em relação ao fasor da corrente primária. O ângulo de fase é expresso normalmente em minutos ou centirradianos.

3.1.2. Carga.

Impedância do circuito secundário externo de um transformador para instrumentos expressa pela potência aparente absorvida em volt-ampéres, com um fator de potência especificado e à corrente secundária nominal.

3.1.3. Carga nominal.

Carga na qual se baseiam os requisitos de exatidão de um transformador para instrumentos.

3.1.4. Carga resistiva nominal. R_c .

Valor nominal da carga resistiva conectada aos terminais secundários, expresso em ohms.

3.1.5. Circuito secundário externo.

Circuito externo alimentado pelo enrolamento secundário de um transformador para instrumentos.

3.1.6. Classe de exatidão.

Designação dada a um transformador de corrente quando os erros dele permanecerem dentro de limites especificados sob condições prescritas de uso.

3.1.7. Corrente de excitação. I_e .

Valor eficaz de corrente que percorre o enrolamento secundário de um transformador de corrente quando se aplica, aos seus terminais, uma tensão senoidal de frequência nominal, estando o enrolamento primário e os outros enrolamentos em aberto.

3.1.8. Corrente primária.

Corrente que percorre o enrolamento primário de um transformador de corrente.

3.1.9. Corrente primária nominal. I_p .

Valor da corrente primária que consta da especificação de um transformador de corrente e que determina as suas condições de funcionamento.

3.1.11. Corrente secundária.

Corrente que flui no enrolamento secundário e no circuito secundário de um transformador de corrente, quando se aplica corrente no primário.

3.1.12. Corrente secundária nominal. I_s .

Valor da corrente secundária que consta da especificação de um transformador de corrente e que determina suas condições de funcionamento.

3.1.15. Corrente térmica contínua nominal.

Valor da corrente máxima que pode circular continuamente no enrolamento primário, estando o enrolamento secundário conectado à carga nominal, sem que a elevação de tempe-

ratura exceda os valores especificados. Este valor corresponde ao produto da corrente nominal pelo fator térmico.

3.1.16. Enrolamento primário.

Enrolamento pelo qual flui a corrente a ser transformada.

3.1.17. Enrolamento secundário.

Enrolamento que alimenta circuitos de corrente de instrumentos de medição, dispositivos de proteção ou dispositivos de controle.

3.1.18. Erro de corrente (erro de relação).

Valor percentual, referido à corrente primária, da diferença da corrente secundária multiplicada pela relação nominal e a corrente eficaz primária, em regime senoidal obtido pela equação:

$$E_r(\%) = \frac{R_n \times I_s - I_p}{I_p} \times 100$$

onde:

R_n é a relação nominal do TC;

I_s é o valor eficaz da corrente secundária;

I_p é o valor eficaz da corrente primária.

3.1.19. Erro de corrente composto.

Em regime permanente, o valor eficaz da diferença entre os valores instantâneos da corrente primária, e os valores instantâneos da corrente secundária multiplicada pela relação de transformação nominal. Os sinais positivos das correntes primária e secundária correspondem às convenções adotadas para marcação dos terminais. O erro composto E_c é expresso geralmente em porcentual do valor eficaz da corrente primária conforme equação a seguir:

$$E_c(\%) = \frac{1}{I_p} \left[\frac{1}{T} \int_0^T (R_n \times i_s - i_p)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \times 100$$

onde:

I_p é o valor eficaz da corrente primária;

R_n é a relação nominal do TC;

i_p é o valor instantâneo da corrente primária;

i_s é o valor instantâneo da corrente secundária;
T é a duração de um ciclo da corrente primária.

3.1.20. Fator térmico. Ft.

Fator que multiplica a corrente primária nominal de um transformador de corrente para obter a corrente primária máxima que ele é capaz de conduzir em regime contínuo à frequência nominal e com a maior carga especificada, sem exceder os limites de elevação de temperatura e a classe de exatidão especificados.

3.1.22. Fator de correção de relação. FCR.

Fator pelo qual é multiplicada a relação nominal de um transformador para instrumentos para se obter a sua relação real em uma dada condição de funcionamento.

3.1.27. Potência nominal.

Valor da potência aparente (em volt ampére, com fator de potência especificado) suprida pelo transformador, por meio do circuito secundário, à corrente secundária nominal e com carga nominal conectada a ele, mantendo a exatidão especificada.

3.1.28. Relação nominal. Rn.

Razão da corrente primária nominal para a corrente secundária nominal.

3.1.29. Relação real. Rr.

Razão do valor eficaz da corrente primária para o valor eficaz da corrente secundária em condições especificadas.

3.1.30. Resistência do enrolamento secundário. Rtc.

Resistência em corrente contínua do enrolamento secundário expressa em ohms, corrigida a 75°C ou a outra temperatura especificada.

3.1.38. Transformador para instrumentos.

Transformador que alimenta instrumentos de medição, dispositivos de controle ou dispositivos de proteção.

3.1.39. Transformador de corrente.

Transformador para instrumentos, cujo enrolamento primário é ligado em série em um circuito elétrico, e que reproduz, no seu circuito secundário, uma corrente proporcional à do seu circuito primário, com sua posição fasorial substancialmente mantida. Os transformadores de corrente destinam-se à proteção e à medição.

3.2 . Definições adicionais para transformadores de medição.

3.2.1. Transformador de corrente para medição.

Transformador de corrente destinado a fornecer sinais para instrumentos de medição ou medidores.