

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**REGULADOR de TENSÃO através da VARIAÇÃO de
RELUTÂNCIA de um NÚCLEO FERROMAGNÉTICO
SATURÁVEL.**

Samuel Domingos Maganeti Lazarin

PROJETO DE FORMATURA / 2006

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



PROJETO DE FORMATURA / 2006

**REGULADOR de TENSÃO através da VARIAÇÃO de
RELUTÂNCIA de um NÚCLEO FERROMAGNÉTICO
SATURÁVEL.**

ALUNO: Samuel Domingos Maganeti Lazarin

ORIENTADOR: Ivan Eduardo Chabu

COORDENADORES: Eduardo César Senger e Lourenço Matakas Júnior

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e à minha namorada que me apoiaram com carinho em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao término deste período de estudos, agradeço aos amigos professores e colegas de faculdade que, de alguma forma, contribuíram para o andamento deste projeto. Em especial agradeço aos meus orientadores e coordenadores pela dedicação e prontidão nos momentos de dificuldades e dúvidas. Também agradeço à empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. que cedeu o material e construiu o protótipo do equipamento estudado neste trabalho.

RESUMO

Lazarin, S. D. M. **Regulador de tensão através da variação de relutância de um núcleo ferromagnético saturável**. Projeto de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Uma proposição alternativa para transformadores reguladores de tensão é apresentada. A propriedade de saturação magnética de materiais ferromagnéticos e a lei da indução magnética são utilizadas conjuntamente para permitir a regulação da tensão na saída do equipamento que possui dois tipos de enrolamentos: os enrolamentos de corrente e tensão alternada, e os enrolamentos de corrente e tensão contínua. O objetivo dos enrolamentos de corrente e tensão contínua é o de estabelecer fluxos magnéticos contínuos que saturaram partes específicas núcleo do equipamento provocando nestas partes um aumento relativo da relutância do material ferromagnético. Isto impõe ao fluxo magnético variacional uma modificação de seu percurso dentro do núcleo, consequentemente, provoca-se uma variação da quantidade do fluxo magnético variacional mútuo entre primário e secundário. Esta variação do fluxo magnético variacional mútuo provoca uma variação da tensão induzida nos enrolamentos secundários, permitindo assim o efeito da regulação de tensão. Para avaliar o funcionamento do equipamento, um protótipo foi dimensionado, construído e ensaiado em laboratório para três topologias de ligações elétricas diferentes. O que se observou foi uma forte interferência dos fluxos de dispersão que contribuíram para alta regulação do equipamento tornando duas, das três soluções abordadas, inconveniente para a operação do protótipo em carga. Os resultados dos ensaios experimentais são mostrados e explicados.

Palavras-chave: transformador, saturação magnética, regulação de tensão.

ABSTRACT

Lazarin, S. D. M. **Voltage regulator based on the reluctance variation of a saturable ferromagnetic core.** Thesis Graduation - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

An alternative proposition for voltage regulator transformers is presented. The magnetic saturation property of ferromagnetic materials and the induction law are conjointly used to allow the voltage regulation on the equipment output, which has two kinds of coils: alternating current and voltage coils, and continuous current and voltage coils. The purpose of continuous current and voltage coils is to establish continuous magnetic flux which saturates specific parts of the equipment core. This situation forces a pathway modification of the alternating magnetic flux inside the core. In consequence, the pathway modification causes a mutual alternating magnetic flux module variation between primary and secondary coils. This variation causes an induced voltage variation in the secondary coils and finally the output voltage variation of the equipment. To ensure that the equipment really works, an experimental prototype was projected for laboratory tests. The tests results showed that magnetic leakage flux causes a bad voltage regulation in two of three electrical topology connections. The test results with experimental prototype are showed and explained.

Keywords: transformer, magnetic saturation, voltage regulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transformador regulador de tensão	14
Figura 2 – Enrolamento paralelo	15
Figura 3 – Reator preventivo.....	16
Figura 4 – Transformador booster.....	17
Figura 5 – Ciclo de histerese e curva de magnetização.....	18
Figura 6 – Localização das bobinas de corrente contínua.....	21
Figura 7 – Localização dos enrolamentos primário e secundário	21
Figura 8 – Interação entre fluxos magnéticos AC e DC	22
Figura 9 – Localização de todos os enrolamentos.....	23
Figura 10 – Vistas e dimensões do núcleo ferromagnético.....	24
Figura 11 – Camadas alternadas do núcleo do protótipo	25
Figura 12 – Montagem do núcleo ferromagnético do protótipo	25
Figura 13 – Curva $B \times H$ do aço silício E230C3	26
Figura 14 – Vistas e dimensões dos moldes para as bobinas AC	27
Figura 15 – Vistas e dimensões do molde para as bobinas DC.....	29
Figura 16 – Montagem das bobinas do protótipo.....	29
Figura 17 – Vista frontal do protótipo montado.....	30
Figura 18 – Visão superior – bornes dos terminais de todos os enrolamentos disponíveis	30
Figura 19 – Topologia 1 – funcionamento em vazio	31
Figura 20 – Topologia 1 – circuito elétrico.....	32
Figura 21 – Topologia 1 – montagem em laboratório.....	34
Figura 22 - Topologia 1 – ensaio experimental em vazio – valores em RMS	35
Figura 23 – Topologia 1 – funcionamento em carga	36
Figura 24 – Topologia 1 – operação em vazio ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=0A$).....	38
Figura 25 – Topologia 1 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=0A$).....	39
Figura 26 – Topologia 1 – operação em carga ($I_{sat1}=1A$, $I_{sat2}=0A$).....	39
Figura 27 – Topologia 1 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=1A$).....	40
Figura 28 – Topologia 2 – funcionamento em vazio	41
Figura 29 – Topologia 2 – circuito elétrico.....	41
Figura 30 – Topologia 2 – montagem em laboratório.....	43
Figura 31 – Topologia 2 – ensaio experimental em vazio	44
Figura 32 – Equipamento transformador convencional	45

Figura 33 – Topologia 2 – funcionamento em carga	46
Figura 34 – Topologia 2 – operação em vazio ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=0A$).....	47
Figura 35 – Topologia 2 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat1}=0A$).....	48
Figura 36 – Topologia 2 – operação em carga ($I_{sat1}=1A$, $I_{sat2}=0A$).....	48
Figura 37 – Topologia 2 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=1A$).....	49
Figura 38 – Topologia 3 – funcionamento em vazio	50
Figura 39 – Topologia 3 – funcionamento em carga	51
Figura 40 – Topologia 3 – circuito elétrico	52
Figura 41 – Topologia 3 – montagem em laboratório.....	53
Figura 42 – Foto do bancada do laboratório	53
Figura 43 – Topologia 3 – ensaio experimental em vazio	54
Figura 44 – Topologia 3 – ensaio experimental em carga para cargas resistivas de corrente constante.....	56
Figura 45 – Topologia 3 – ensaio experimental em carga para cargas resistivas de impedância constante.....	57
Figura 46 – Topologia 3 – relações entre potencias ativas AC e DC para cargas de corrente constante.....	58
Figura 47 – Topologia 3 – circuito elétrico equivalente – indutâncias próprias e mútuas.....	59
Figura 48 – Topologia 3 – circuito equivalente – indutâncias de dispersão e magnetização ..	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Procedimento para comutação com o enrolamento paralelo.....	16
Tabela 2 – Quantidade de peças necessárias para consutrução do núcleo	25
Tabela 3 – Topologia 1 – funcionamento teórico em vazio.....	33
Tabela 4 – Topologia 1 – verificação dos resultados.....	36
Tabela 5 – Topologia 2 – funcionamento teórico em vazio.....	43
Tabela 6 – Topologia 2 – verificação dos resultados.....	44
Tabela 7 – Topologia 3 – funcionamento teórico em vazio.....	52
Tabela 8 – Topologia 3 – verificação dos resultados.....	54
Tabela 9 – Topologia 3 – tensão E_C em função da corrente I_{sat2} para várias correntes I_2 resistivas.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO.....	12
3. METODOLOGIA	12
4. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	13
4.1 COMUTADORES DE TENSÃO	13
4.1.1 ENROLAMENTO PARALELO.....	15
4.1.2 REATOR PREVENTIVO.....	16
4.1.3 TRANSFORMADOR BOOSTER.....	17
4.2 IDÉIAS PRECURSORAS	18
5. CONFIGURAÇÃO ALTERNATIVA PROPOSTA	20
5.1 TOPOLOGIA E FUNCIONAMENTO.....	20
5.2 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO	23
5.2.1 DIMENSIONAMENTO DO NÚCLEO FERROMAGNÉTICO.....	23
5.2.2 DIMENSIONAMENTO DAS BOBINAS AC	26
5.2.3 DIMENSIONAMENTO DAS BOBINAS DC	28
5.2.4 FINALIZAÇÃO DA MONTAGEM DO PROTÓTIPO	30
5.3 TOPOLOGIA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA 1 – TRANSFORMADOR ISOLADOR.....	31
5.3.1 ESTUDO DE FUNCIONAMENTO.....	31
5.3.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO COM A TOPOLOGIA 1 E OBSERVAÇÕES.....	34
5.4 TOPOLOGIA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA 2 – AUTOTRANSFORMADOR COM DOIS ENROLAMENTOS SÉRIE	40
5.4.1 ESTUDO DE FUNCIONAMENTO	40
5.4.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO E OBSERVAÇÕES	43
5.5 TOPOLOGIA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA 3 – AUTOTRANSFORMADOR COM UM ENROLAMENTO SÉRIE	49
5.5.1 ESTUDO DE FUNCIONAMENTO	49
5.5.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO E OBSERVAÇÕES	52

6. A BUSCA POR UM CIRCUITO EQUIVALENTE PARA A TOPOLOGIA 3 – AUTOTRANSFORMADOR COM UM ENROLAMENTO SÉRIE	58
7. CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão, subtransmissão e de distribuição de energia elétrica possuem classes fixas de tensões que devem ser mantidas para a operação nominal do sistema elétrico. Por outro lado, a variação temporal da demanda impõe às redes condições diferentes de carregamento e operação.

Diferentes condições de carregamento implicam em diferentes valores de queda de tensão no sistema de transporte. Estas quedas estão associadas à não idealidade dos equipamentos, pois estes possuem impedâncias que podem ser distribuídas, como em condutores elétricos, ou concentradas, como nos enrolamento dos equipamentos eletromagnéticos. Como consequência, pode-se identificar um afundamento da tensão próximo aos centros consumidores, principalmente nos que se localizam longe das centrais de geração ou distribuição.

Para contornar esta deficiência, os transformadores dispostos ao longo da rede de transporte são dotados de taps móveis capazes de ajustar o nível de tensão entregue aos consumidores. Este ajuste é feito de modo que se garanta uma tensão pré-determinada compatível com os equipamentos dos consumidores. Porém a comutação de taps em carga expõe o transformador a um desgaste físico. As partes móveis e condutoras ficam sujeitas a arcos elétricos e a atritos mecânicos, ocasionando ao longo do tempo, deterioração dos taps.

2. OBJETIVO

A proposta deste trabalho é a de estudar a viabilidade técnica de uma alternativa para transformadores reguladores de tensão em carga cuja topologia é isenta de taps móveis. Para isso, serão realizados ensaios em laboratório com um equipamento protótipo.

3. METODOLOGIA

O trabalho está dividido em quatro etapas. A primeira consiste em uma pesquisa bibliográfica a partir de livros e artigos técnicos para um embasamento teórico no que se diz respeito à

análise de circuitos magnéticos, ao ferromagnetismo e aos tipos convencionais de transformadores reguladores de tensão.

A segunda etapa do projeto consiste em dimensionar a topologia alternativa do equipamento e detalhar suas dimensões e número de espiras. Ao final deste dimensionamento será levantado o material necessário para a construção de um protótipo que deverá ser montado ainda nesta mesma etapa.

A terceira etapa do projeto consiste em explorar as diversas formas de se conectar eletricamente o equipamento protótipo de modo que estas ligações permitam a regulação de tensão fundamentada nos princípios alternativos que motivaram este trabalho. Seguido desse estudo inicial, o protótipo será ensaiado em suas diversas topologias de ligação elétrica a fim de se comprovar o funcionamento do equipamento regulador de tensão.

Por fim, a quarta etapa do projeto refaz um estudo eletromagnético do equipamento baseado nas observações e medições feitas na etapa anterior. Deste modo será possível refinar o entendimento do circuito magnético e os motivos pelos quais algumas topologias de ligação elétrica provêm má ou boa regulação.

4. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

4.1 COMUTADORES DE TENSÃO

Basicamente, existem dois grandes grupos de transformadores reguladores de tensão: aqueles que permitem a regulação de tensão em carga e aqueles que não permitem, ou seja, equipamentos que não regulam tensão em carga e que precisam, eventualmente, ter sua tensão de saída ajustada, necessitam ser inicialmente isolados do sistema. Em ambos os grupos, o processo de regulação ocorre através da modificação do tap, isto é, modifica-se a relação de espiras entre primário e secundário.

A Figura 1 exemplifica um caso simples em que se deseja aumentar a tensão do secundário de um transformador regulador de tensão a partir de taps disponíveis em seu primário.

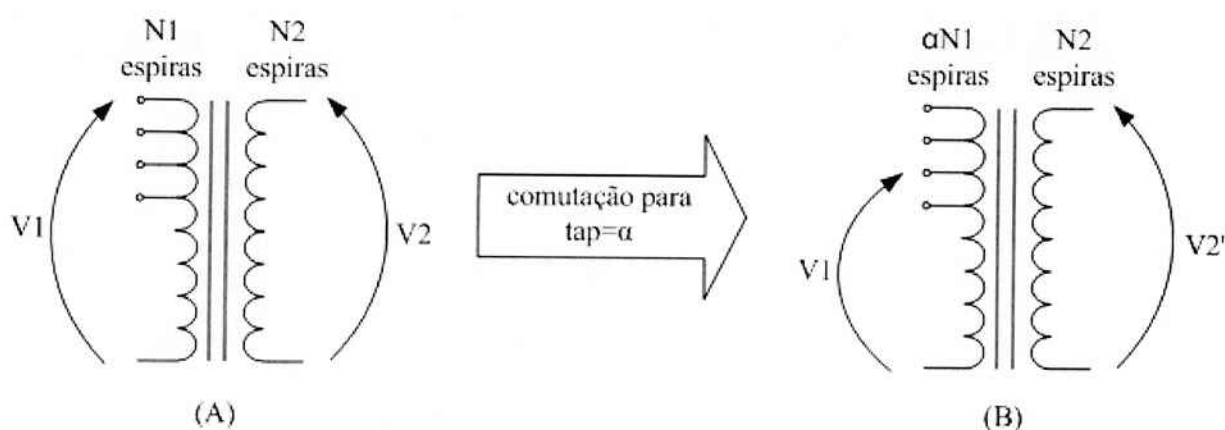


Figura 1 – Transformador regulador de tensão

Matematicamente, o tap é definido como sendo a relação entre a quantidade de espiras selecionadas em um enrolamento e a quantidade total de espiras deste mesmo enrolamento. Portanto seu valor sempre estará no intervalo: $0 \leq \text{tap} \leq 1$.

Na Figura 1 (A) tem se que:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_1$$

Após a comutação, na Figura 1 (B) ter-se-á:

$$V_2' = \frac{N_2}{\alpha \cdot N_1} \cdot V_1 = \frac{V_2}{\alpha \cdot V_1} \cdot V_1 = \frac{V_2}{\alpha}$$

Portanto: $V_2' > V_2$, como era esperado.

Transformadores que necessitam ser isolados da rede elétrica para a regulação de tensão, perdem em dinamicidade. Ao mesmo tempo, seu circuito de regulação é mais simples, pois o mecanismo é constituído basicamente por chaves secas que fecham o contato entre o terminal do transformador com o tap desejado.

Em contrapartida, os transformadores que possuem taps comutáveis em carga, possuem também um sistema de supervisão de tensão. Este sistema de supervisão compara a tensão de saída do transformador com uma tensão de referência pré-estabelecida a fim de controlar a posição de seu tap no primário. Soma-se a isto a complexidade inerente a este tipo de comutador em carga que necessita suportar, durante a comutação, correntes elevadas e desgastes mecânicos causados pelo aparecimento de arcos elétricos.

A seguir, apresentam-se alguns métodos para comutadores de taps em carga [1].

4.1.1 ENROLAMENTO PARALELO

Nesta topologia, o enrolamento que possui o tap é duplicado e opera em paralelo. Isto permite que, durante a comutação, não haja interrupções de transferência de energia do primário para o secundário, pois os enrolamentos paralelos podem operar de maneira alternada.

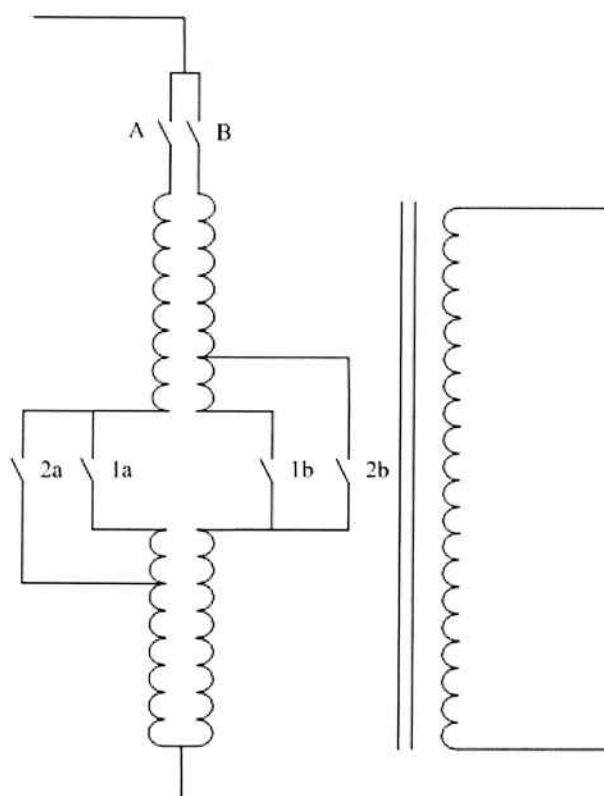


Figura 2 – Enrolamento paralelo

A operação com $\text{tap}=1$ ocorre para a situação em que A, B, 1b e 1a estão fechadas e 2a e 2b estão abertas, sendo que nesta condição os enrolamentos do primário operam em paralelo. Para se efetuar a transição para um tap menor, que causará um aumento na tensão de saída do equipamento, executam-se os passos expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Procedimento para comutação com o enrolamento paralelo

Passo	Ação
1	abre-se A
2	abre-se 1a
3	fecha-se 2a
4	fecha-se A
5	abre-se B
6	abre-se 1b
7	fecha-se 2b
8	fecha-se B

Nota-se que entre o passo 4 e 5, surge uma corrente interna que circula pelos enrolamentos do primário. Esta corrente provém da temporária diferença de espiras em paralelismo neste momento da comutação. Este fenômeno de sobrecarga, somado ao fato de se ter para cada tap uma quantidade dobrada de comutadores, torna esta topologia obsoleta e cara.

4.1.2 REATOR PREVENTIVO

A idéia principal aplicada a este tipo de comutador de taps é a inclusão de um reator preventivo que limita a corrente de curto circuito que se estabelece no instante em que a comutação está em andamento. Exemplifica-se na Figura 3 a topologia em questão:

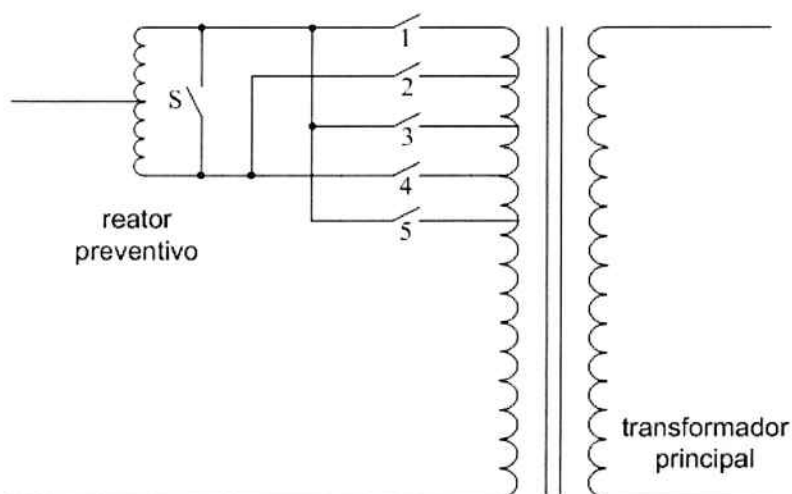


Figura 3 – Reator preventivo

Para o tap igual a 1, opera-se com S fechada e 1 fechada. Deste modo, o reator preventivo fica em curto-circuito. Para o tap subsequente menor, abre-se S e fecha-se 2. Neste momento a corrente de curto circuito elevada é limitada pela reatância do reator preventivo. Na seqüência abre-se 1 e fecha-se S de modo a retirar novamente o reator preventivo do circuito.

4.1.3 TRANSFORMADOR BOOSTER

Este tipo de topologia é utilizada quando não existe a possibilidade de se adicionar comutadores nos enrolamentos do transformador principal. Ao invés disso, insere-se na saída do transformador um regulador de tensão com comutadores, uma chave de reversão e um transformador *booster*.

O princípio de funcionamento está esquematizado na Figura 4. Dependendo da posição do comutador no regulador de tensão, o transformador *booster* (instalado em série na linha), incrementa ou decrementa a tensão vista em sua saída. Já a chave de reversão inverte a fase da tensão que aparece nos terminais do transformador *booster*, podendo assim incrementar ou decrementar a tensão na saída do equipamento.

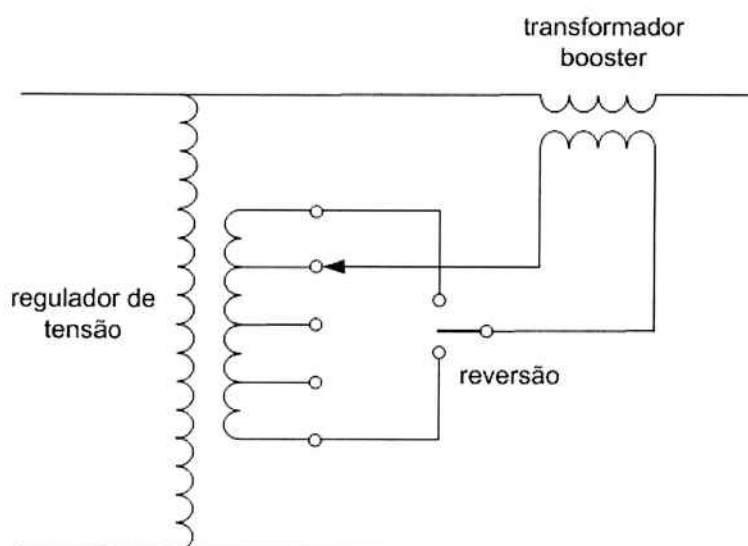


Figura 4 – Transformador booster

Como este sistema está desconectado dos enrolamentos principais do transformador, sua capacidade de corrente circulante é menor, o que torna o sistema mais barato. Ao mesmo tempo, o uso destes equipamentos na saída do transformador principal, exige um espaço físico extra (além da área ocupada pelo transformador) para sua instalação.

4.2 IDÉIAS PRECURSORAS

A solução proposta para o regulador de tensão sem taps móveis surge a partir da observação do fenômeno de saturação de magnetização em materiais ferromagnéticos e da lei de indução (Michael Faraday, 1831).

A saturação magnética de materiais ferromagnéticos é ocasionada devido ao alinhamento de seus domínios magnéticos microscópicos. À medida que algum material ferromagnético é exposto a um campo magnético externo de intensidade crescente, os domínios microscópicos deste material, que antes eram orientados ao acaso, tendem a se orientar na direção do campo externo aplicado, isto é, o material magnetiza-se. A partir de certo valor deste campo externo, os domínios do material ferromagnético apontam quase todos numa mesma direção, e um eventual acréscimo da intensidade do campo externo, não ocasiona um aumento proporcional da magnetização do material, uma vez que o material está próximo à saturação.

A representação deste fenômeno é feita através das curvas de histerese e da curva de magnetização do material ferromagnético. As aparências típicas destas curvas são apresentadas na Figura 5.

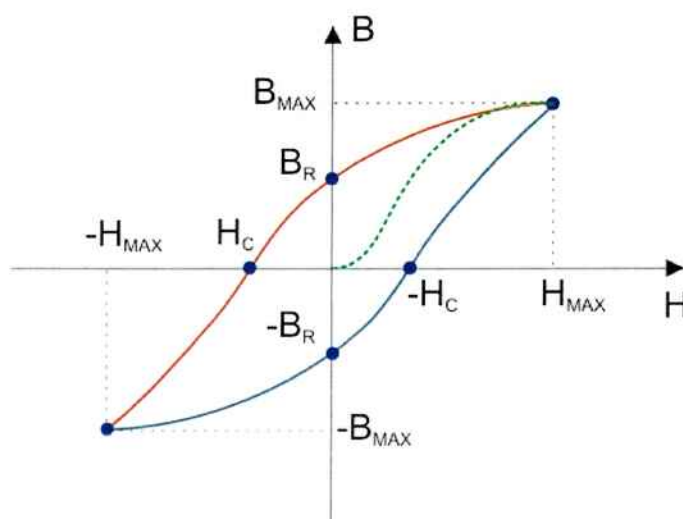


Figura 5 – Ciclo de histerese e curva de magnetização

A curva de magnetização aparece em linhas verdes tracejadas na Figura 5, sendo a mesma traçada a partir dos pontos máximos atingidos pelo ciclo de histerese dado um campo magnético externo H_{MAX} definido. O ciclo de histerese, por sua vez está representado na Figura 5 em linhas contínuas e revela que materiais ferromagnéticos possuem “memória”, isto é, existe uma magnetização remanente ($\pm B_R$) fruto de uma parcela de domínios magnéticos

que continuam alinhados mesmo após a retirada do campo de intensidade magnética ($H=0$). Para que a magnetização do material seja completamente zerada ($B=0$), é necessário que seja imposto um campo de intensidade magnética no sentido contrário ao alinhamento dos domínios ($\pm H_C$) [2].

O fenômeno de saturação indica que os materiais ferromagnéticos possuem limites para a densidade de campo magnético estabelecidos em seu interior. Para uma dada área de superfície deste material, analogamente, pode-se dizer que existe um limite para a quantidade de fluxo magnético que atravessa essa área.

Por outro lado, equipamentos que utilizam acoplamento magnético para a transferência de energia, como é o caso dos transformadores, possuem seu funcionamento baseado na lei de indução de Faraday resumida na Equação (1).

$$E = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1)$$

Os fluxos magnéticos variáveis no tempo Φ_m , concatenam-se com os enrolamentos destes equipamentos (N espiras) e, por indução, geram uma força eletromotriz E nos terminais dos enrolamentos. Portanto há uma relação proporcional entre a tensão induzida nos enrolamentos e a quantidade de fluxo concatenado que varia no tempo. Supondo um fluxo magnético concatenado, que varia senoidalmente no tempo, quanto maior for o módulo deste fluxo, maior será a tensão induzida no enrolamento e vice-versa. Assim:

$$\Phi_m = \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t)$$

$$E = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -N\omega\Phi_{\max} \cdot \cos(\omega t)$$

$$|E_{\max}| = N2\pi f \cdot \Phi_{\max}$$

Portanto:

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} Nf \cdot \Phi_{\max} = 4,44 Nf \cdot \Phi_{\max} \quad (2)$$

Portanto, a configuração alternativa para o transformador regulador de tensão faz uso das características de saturação do material ferromagnético para limitar o fluxo mútuo variacional

entre primário e secundário. Esta limitação implica, necessariamente, numa variação da tensão induzida no secundário do transformador.

Nos itens seguintes haverá um maior detalhamento da solução alternativa proposta.

5. CONFIGURAÇÃO ALTERNATIVA PROPOSTA

5.1 TOPOLOGIA E FUNCIONAMENTO

Com o intuito de se controlar a tensão nos terminais de saída de um equipamento transformador de tensão, a proposta para o funcionamento da solução idealizada faz uso de enrolamentos auxiliares de corrente contínua a fim de se estabelecer fluxos magnéticos constantes em determinados braços do núcleo ferromagnético.

Estes fluxos magnéticos constantes unidos ao fluxo magnético mútuo variacional (imposto pelos enrolamentos primário e secundário do transformador) caracterizam um determinado ponto de operação do material ferromagnético.

O ponto de operação, que varia de braço para braço, está relacionado com a magnetização do material ditada pela curva de magnetização BH. O ponto de operação varia conforme o braço analisado, pois a topologia sugerida gera situações em que coexistem fluxos magnéticos (variacionais e contínuos) concordantes (que se somam), e fluxos discordantes (que se subtraem).

Desta maneira, pode-se explorar a curva de saturação do material ferromagnético para se manipular o valor de sua permeabilidade e, automaticamente, de sua relutância imposta a cada braço do equipamento. Esta variação de relutância impõe uma modificação do percurso do fluxo magnético mútuo variacional entre primário e secundário. Sabendo-se que o fluxo mútuo variacional é o ente responsável pela indução de força eletromotriz nas bobinas do equipamento, sua manipulação dentro do núcleo tem o intuito de promover, portanto, uma variação da tensão no enrolamento secundário do equipamento e, conseqüentemente, na tensão entregue à carga que o equipamento alimenta.

A topologia sugerida é apresentada a seguir na Figura 6 e na Figura 7.

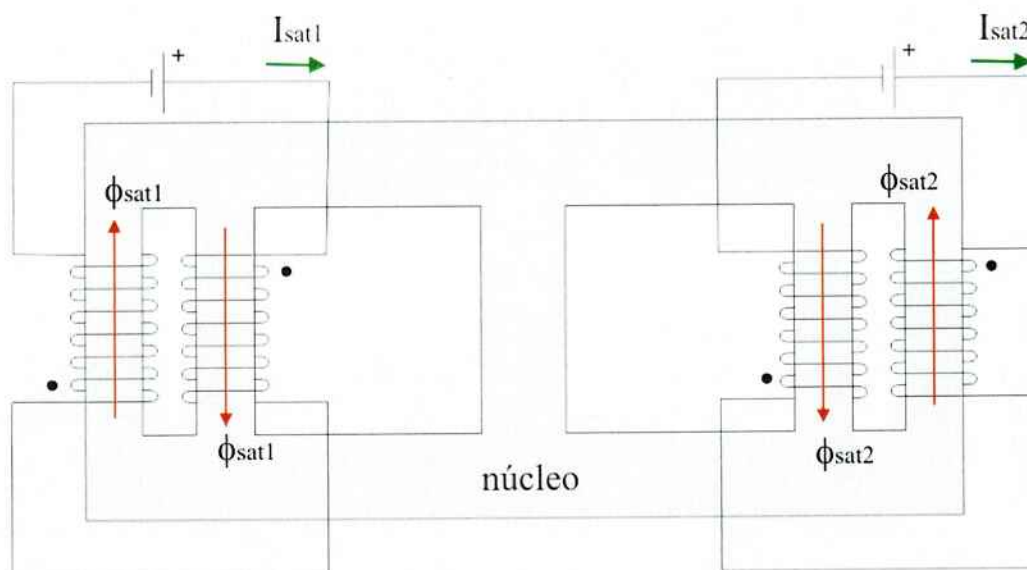


Figura 6 – Localização das bobinas de corrente contínua

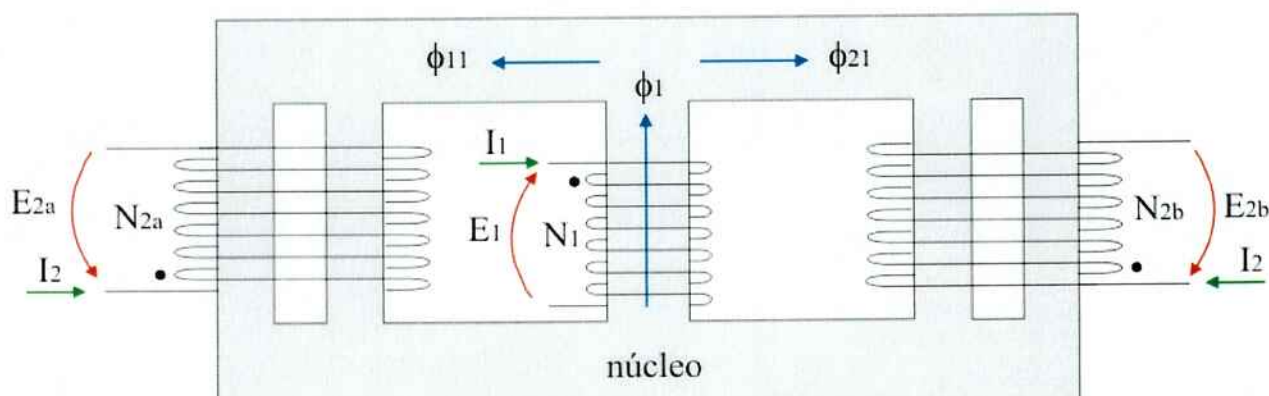


Figura 7 – Localização dos enrolamentos primário e secundário

A Figura 6 demonstra a localização das bobinas de corrente contínua do núcleo e a Figura 7 demonstra a localização das bobinas de corrente e tensão alternada (primário e secundários) do transformador monofásico.

Destaca-se que a Figura 6 e a Figura 7 representam o mesmo equipamento. Portanto, por construção, as bobinas secundárias envolvem as bobinas de corrente contínua em cada braço lateral do equipamento. As bobinas de corrente contínua estão eletricamente conectadas em série de modo que o fluxo magnético constante produzido seja estabelecido somente nos braços laterais, não colaborando com o fluxo que atravessa o braço central. O fluxo magnético constante gerado pelas bobinas de corrente contínua não induz tensão nas bobinas de corrente alternada que as envolvem, pois este fluxo possui valor líquido concatenado nulo para uma área transversal à bobina secundária.

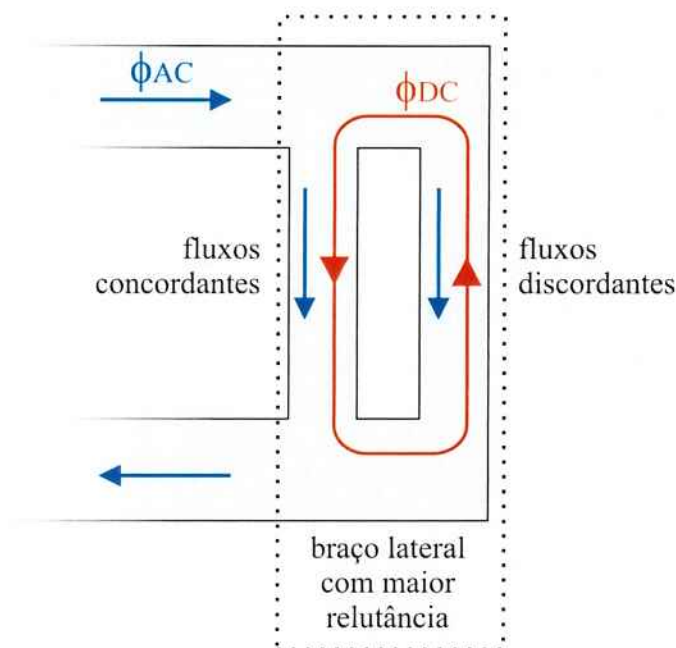


Figura 8 – Interação entre fluxos magnéticos AC e DC

Portanto, são nos braços laterais que ocorrem as combinações entre os fluxos magnéticos variacionais Φ_{AC} e constantes Φ_{DC} . A Figura 8 representa os dois tipos de interação entre os fluxos magnéticos: fluxos concordantes e fluxos discordantes. O efeito global causado por estes dois tipos de interação é um aumento relativo da relutância do braço lateral do equipamento. Isto obriga o fluxo magnético variacional Φ_{AC} a procurar caminhos alternativos de menor relutância. Este caminho é exatamente o braço simetricamente oposto do equipamento, isento de fluxo magnético constante.

A Figura 9 é uma visão em corte transversal do equipamento que consolida a representação simultânea da localização de todos os seus enrolamentos. Nota-se que, inicialmente, tanto os braços laterais (direito e esquerdo) quanto o braço central possuem dois enrolamentos concêntricos (representados na cor azul e vermelha). Construtivamente, no protótipo estão disponíveis os terminais de todos os enrolamentos permitindo às bobinas concêntricas dois tipos de conexão:

- bobinas concêntricas em série, tornando-a uma única bobina com o dobro de espiras do núcleo;
- ou bobinas concêntricas pertencentes ao primário e ao secundário que partilham de um mesmo braço do equipamento.

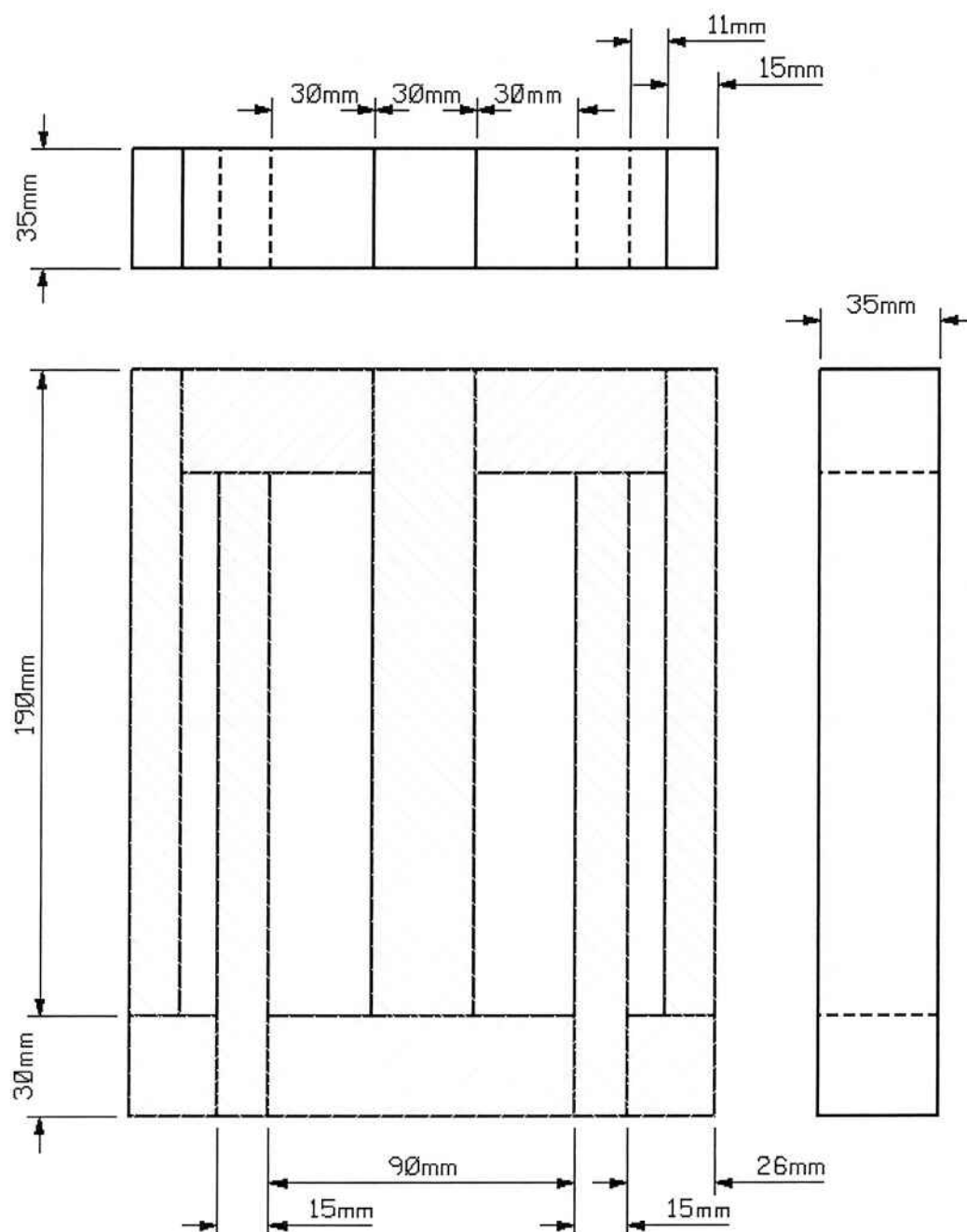


Figura 10 – Vistas e dimensões do núcleo ferromagnético

Cada camada do núcleo é formada por chapas menores retangulares também representadas na Figura 10. Estas pequenas chapas possuem suas posições alternadas de camada para camada, de modo que se reduzam os entreferros que aparecem nos pontos em que as mesmas se encaixam. Além disso, alternar a posição das chapas menores garante uma maior estabilidade física construtiva do núcleo do equipamento. A Figura 11 representa os dois tipos de configuração de camadas que existem no protótipo e que são alternadas durante o empilhamento.

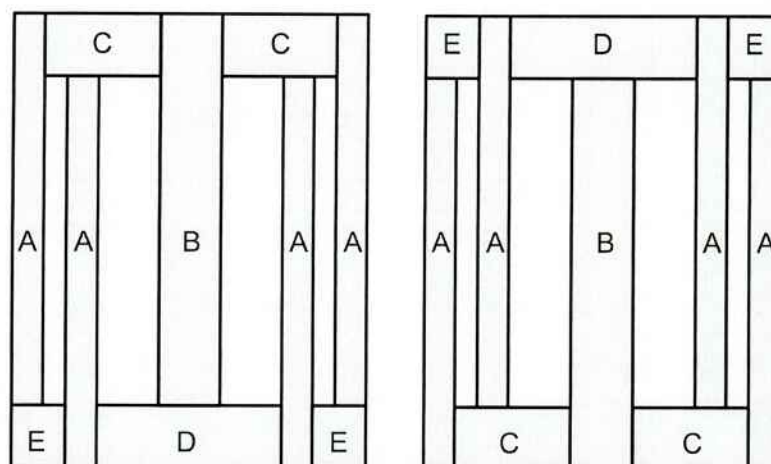


Figura 11 – Camadas alternadas do núcleo do protótipo

Foram empilhadas 70 camadas da chapa de aço silício resultando em um fator de empacotamento de 0,95. A quantidade de chapas menores necessárias está indicada na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade de peças necessárias para consutrução do núcleo

Peça	Dimensões	Quantidade
A	190 × 15 mm	280 peças
B	190 × 30 mm	70 peças
C	56 × 30 mm	140 peças
D	90 × 30 mm	70 peças
E	26 × 30 mm	140 peças

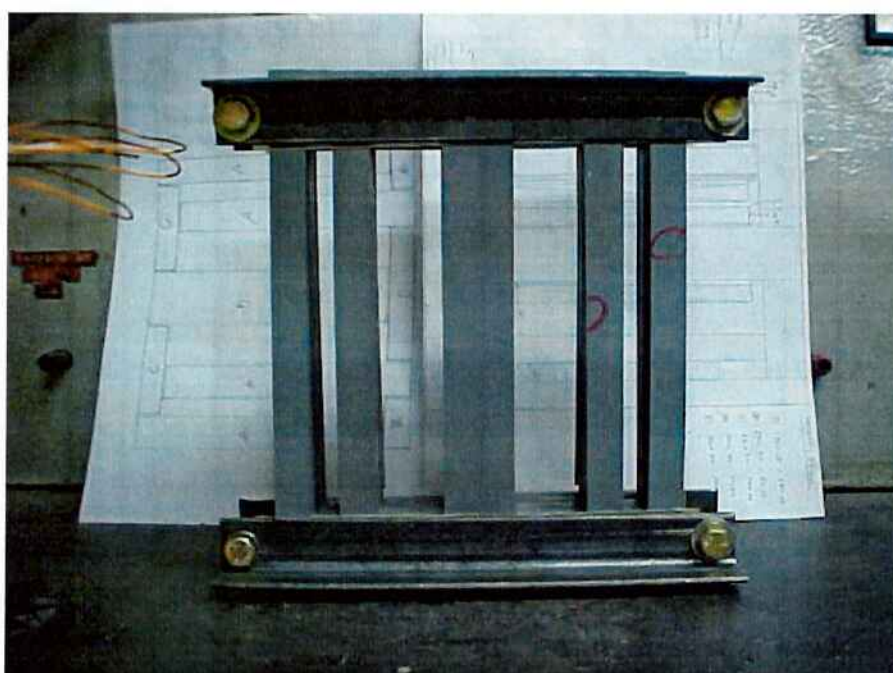


Figura 12 – Montagem do núcleo ferromagnético do protótipo

A Figura 12 é uma foto do núcleo ferromagnético montado sem a alocação dos enrolamentos do protótipo. Destaca-se que a fixação do núcleo é feita por duas barras superiores e duas barras inferiores. Cada par de barras é aparafusado em seus extremos mantendo pressionadas e alinhadas todas as camadas do núcleo.

5.2.2 DIMENSIONAMENTO DAS BOBINAS AC

A curva $B \times H$ do aço silício E230C3 está representada na Figura 13. Nota-se que B [Wb/m²] varia linearmente com H [A/cm] até um valor de aproximadamente: $B = 1,3$ Wb/m² e $H = 2,4$ A/cm.

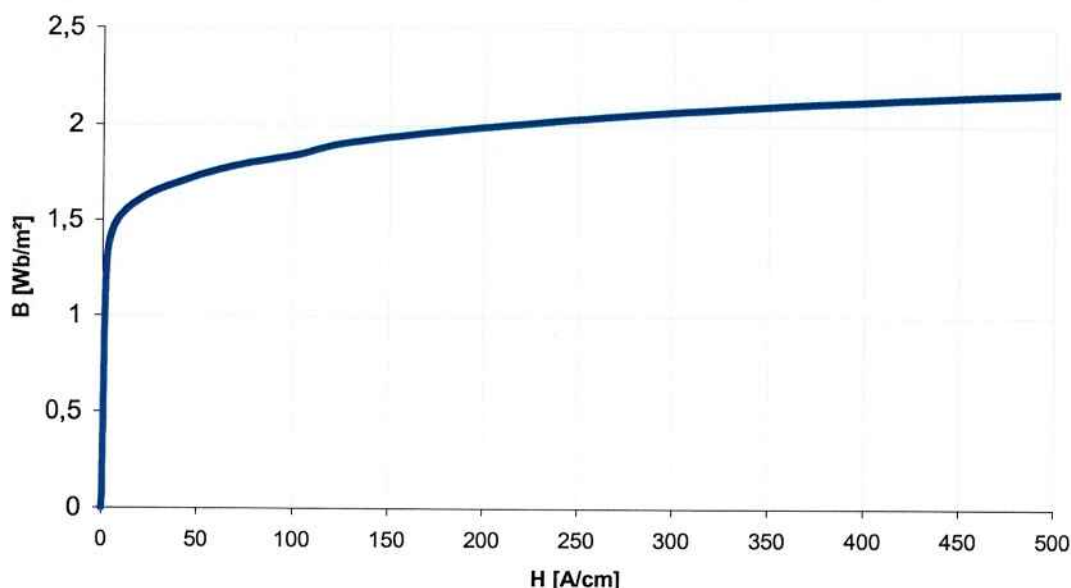


Figura 13 – Curva $B \times H$ do aço silício E230C3

Para o braço central do protótipo, parte-se da premissa que o mesmo não operará na região de saturação. Sendo assim, para o cálculo do número de espiras dos enrolamentos AC parte-se do pressuposto que $B = 1,0$ Wb/m². Segundo a Equação (2), tem-se para o braço central:

$$A_{\text{efetiva}} = 0,03 \cdot 0,035 \cdot 0,95 = 0,0009975 \text{ m}^2$$

$$N_1 = \frac{|E_{\text{rms}}|}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{max}} \cdot A_{\text{efetiva}}} = \frac{220}{4,44 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 0,0009975} \approx 828 \text{ espiras} \rightarrow \text{adotou-se } 800 \text{ espiras}$$

Como as seções dos braços laterais possuem a mesma a mesma área de aço em relação ao braço central, pode-se adotar a mesma quantidade de espiras para estes enrolamentos, sendo assim:

$$N_1 = N_{2a} = N_{2b} = 800 \text{ espiras}$$

Supondo uma densidade de corrente $J = 4 \text{ A/mm}^2$, e uma corrente máxima de $I = 2 \text{ A}$, tem-se que:

$$S_{\text{cabo}} = \frac{I}{J} = \frac{2}{4} = 0,5 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{cabo 20 AWG}$$

O cabo 20 AWG possui seção de $0,52 \text{ mm}^2$ e suporta a corrente de 2 A preestabelecida como a nominal. Cada enrolamento deste tipo é constituído por uma bobina de 5 camadas com 160 espiras por camada.

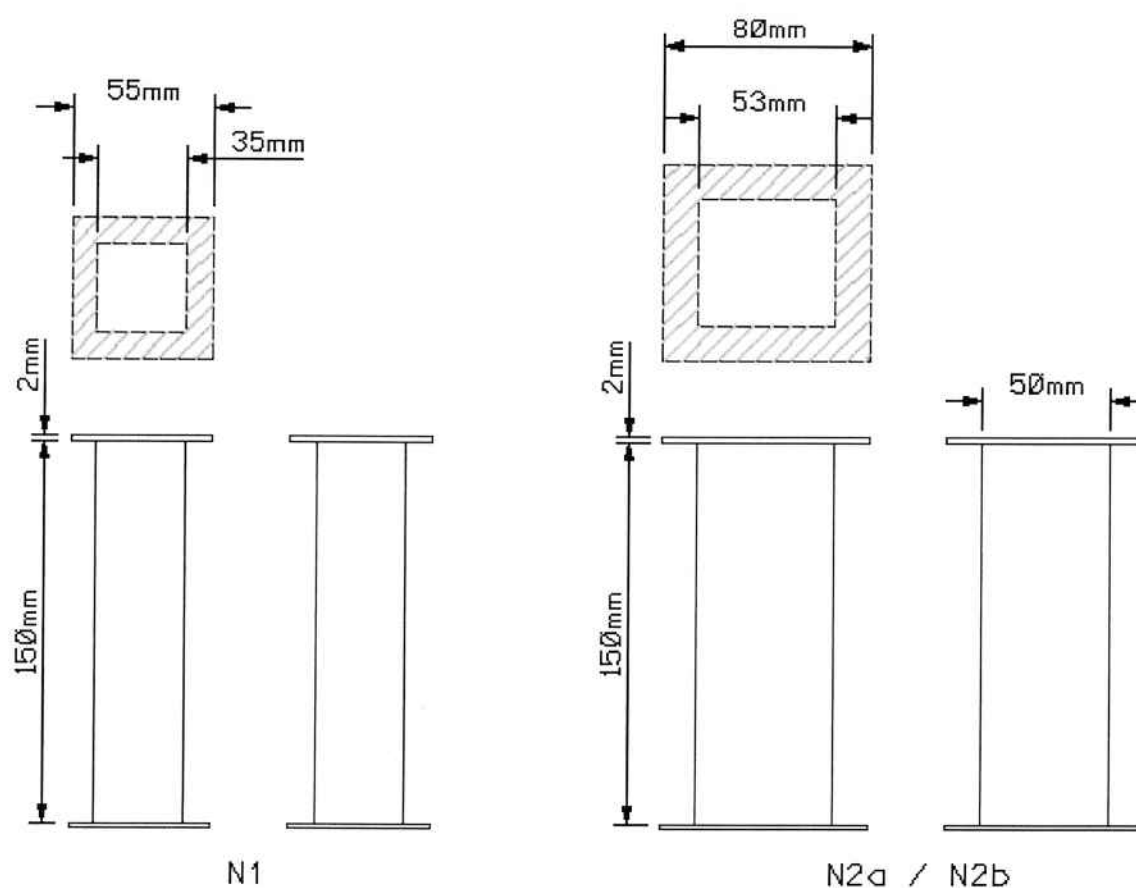


Figura 14 – Vistas e dimensões dos moldes para as bobinas AC

Como dito anteriormente, optou-se por construir duas bobinas concêntricas em cada braço vertical do protótipo, portanto haverá uma bobina interna e outra externa, cada qual com suas 800 espiras.

Serão necessários dois moldes de bobinas: um molde para os braços laterais (que possuem uma abertura central destinado à passagem das bobinas de corrente contínua) e outro molde para o braço central. Os moldes estão representados na Figura 14.

5.2.3 DIMENSIONAMENTO DAS BOBINAS DC

O dimensionamento dos enrolamentos de corrente contínua é feito de modo que, uma corrente de 2 A imponha um campo de indução magnética $B = 1,85 \text{ Wb/m}^2$. Este valor encontra-se na região saturada da curva $B \times H$ como se observa na Figura 13. Para isso tem-se que:

$$B = 1,85 \text{ Wb/m}^2 \xrightarrow{\text{curva BH}} H = 90 \text{ A/cm}$$

$$\ell = 43,2 \text{ cm}$$

$$2 \cdot N_{CC} = \frac{H \cdot \ell}{I} = \frac{90 \cdot 43,2}{2} = 1944 \text{ espiras}$$

$$\Rightarrow N_{CC} = 972 \text{ espiras} \rightarrow \text{adotou-se } N_{CC} = 970 \text{ espiras}$$

Nota-se inicialmente que as bobinas de corrente contínua são divididas em duas metades iguais e alocadas de modo que os fluxos magnéticos constantes criados por cada metade sejam aditivos e se confinem somente nos braços laterais do protótipo como exemplificado na Figura 8 pelo Φ_{DC} .

O cabo utilizado para estes enrolamentos é o 21 AWG que possui seção de $0,41 \text{ mm}^2$ e operará com uma densidade de corrente de aproximadamente 5 A/mm^2 . O molde destas bobinas está representado na Figura 15.

A Figura 16 é uma foto de todos os enrolamentos utilizados no protótipo. Observa-se do lado esquerdo da foto a maneira como os enrolamentos DC são inseridos aos pares no interior dos enrolamentos AC respectivos aos braços laterais.

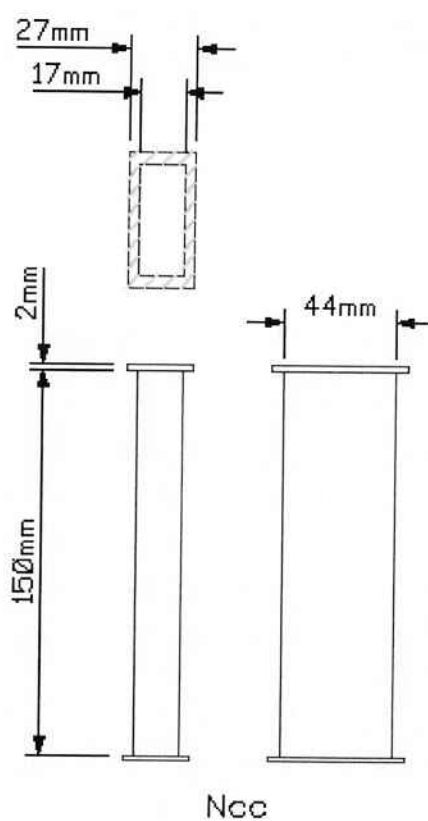


Figura 15 – Vistas e dimensões do molde para as bobinas DC

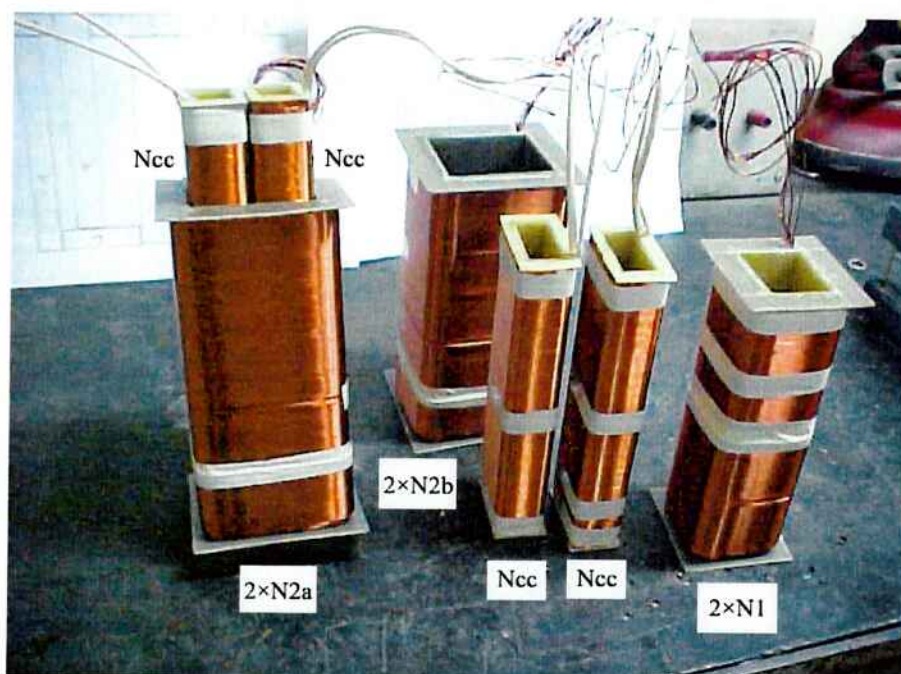


Figura 16 – Montagem das bobinas do protótipo

5.2.4 FINALIZAÇÃO DA MONTAGEM DO PROTÓTIPO

O protótipo finalizado e montado está representado pela Figura 17. Evidencia-se aqui a diferença das dimensões entre os enrolamentos primários (N_1) e secundários (N_{2a} e N_{2b}). Destaca-se também, a maneira como os terminais de todos os enrolamentos ficam disponíveis através dos bornes alocados na parte superior do equipamento.



Figura 17 – Vista frontal do protótipo montado

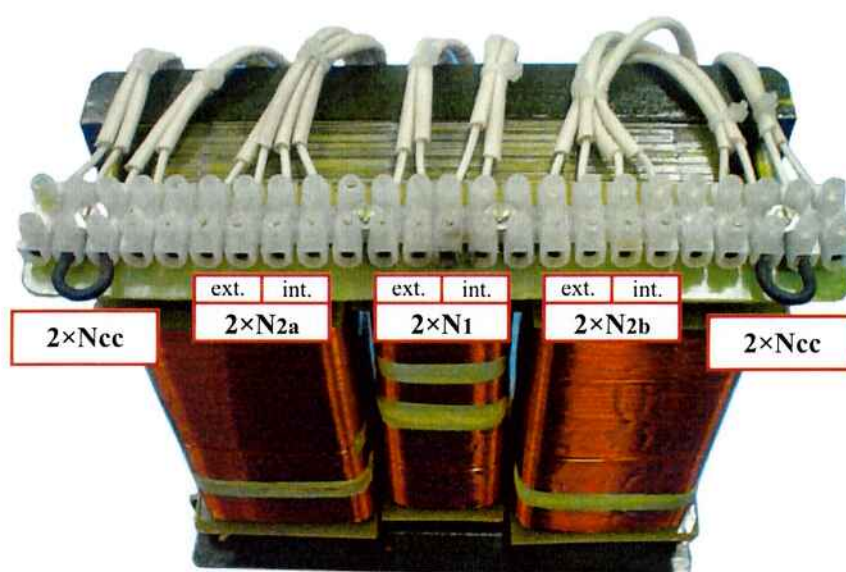


Figura 18 – Visão superior – bornes dos terminais de todos os enrolamentos disponíveis

A Figura 18 representa a localização dos terminais das bobinas. Nota-se que os terminais bobinas N_{CC} estão conectados em série por um pequeno fio através dos bornes. Identifica-se também por esta foto, a localização dos terminais das bobinas concêntricas internas (int.) e externas (ext.).

5.3 TOPOLOGIA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA 1 – TRANSFORMADOR ISOLADOR

5.3.1 ESTUDO DE FUNCIONAMENTO

Complementando a Figura 7 com as ligações elétricas representadas na Figura 19 chega-se a uma configuração em que o protótipo opera como um transformador isolador regulador de tensão, uma vez que neste caso, primário e secundário operam isolados eletricamente, pois toda a energia que passa do secundário para o primário atravessa o meio magnético.

A regulação de tensão E_C esta fundamentada na possibilidade de se alterar a quantidade de fluxo magnético variacional que se fecha pelo lado esquerdo do equipamento Φ_{2a-1} e daquele que se fecha pelo lado direito Φ_{2b-1} . Como Φ_{2a-1} e Φ_{2b-1} resultam do fluxo magnético total imposto pelo primário Φ_1 , um eventual aumento de Φ_{2a-1} , para um mesmo módulo de Φ_1 , significa uma diminuição do módulo de Φ_{2b-1} .

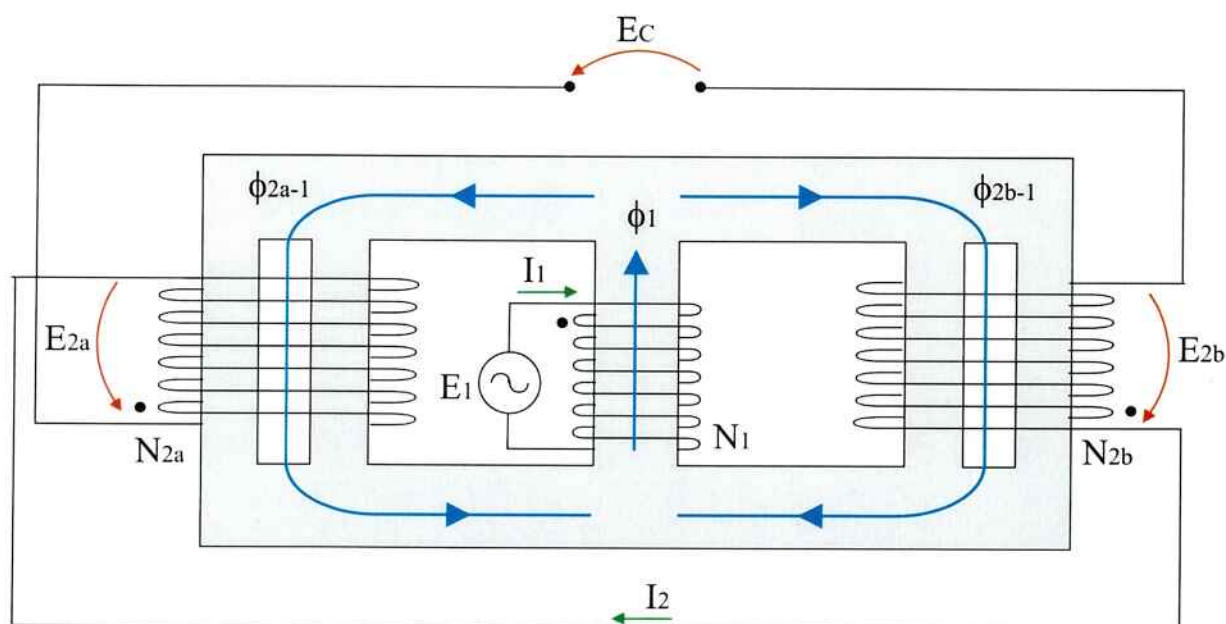


Figura 19 – Topologia 1 – funcionamento em vazio

As equações que regem o funcionamento deste topologia são:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_1 \quad (3)$$

$$E_C = E_{2a} + E_{2b} = 4,44 \cdot f \cdot N_{2a} \cdot \Phi_{2a-1} + 4,44 \cdot f \cdot N_{2b} \cdot \Phi_{2b-1} \quad (4)$$

Portanto, por construção, os enrolamentos secundários instalados em cada braço lateral do transformador, devem possuir quantidades de espiras diferentes para que seja possível evidenciar o fenômeno de regulação de tensão na carga, ou seja, segundo a Equação (4): $N_{2a} \neq N_{2b}$.

O circuito elétrico representado por indutâncias mútuas e próprias desta topologia está esquematizado na Figura 20. Destaca-se que não estão representadas nesta figura as resistências dos enrolamentos de cobre.

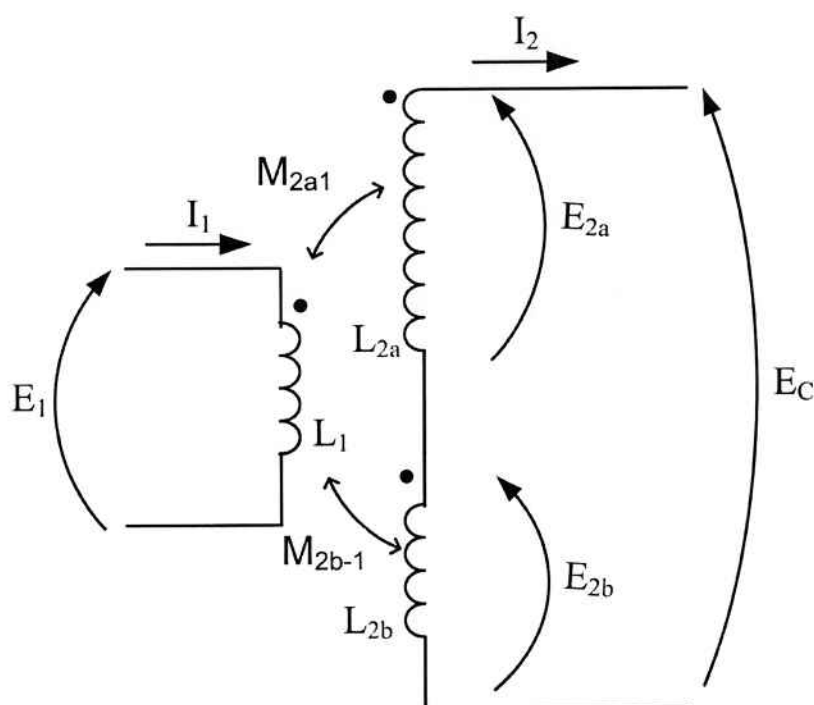


Figura 20 – Topologia 1 – circuito elétrico

Uma primeira análise superficial do funcionamento do equipamento em vazio ($I_2 = 0A$), sem levar em conta as perdas e dispersões, pode ser feita da maneira como colocado abaixo:

Condição A – tensão nominal na saída do equipamento:

Para uma condição “A” de operação do equipamento, as bobinas de corrente contínua estão desligadas. Sendo assim, o fluxo magnético Φ_1 divide-se igualmente para cada lado do

equipamento $\Phi_{2a-1} = \Phi_{2b-1} = \Phi_{1/2}$. A tensão induzida E_C no secundário é dada pela Equação (4).

Condição B – aumento de tensão na saída do equipamento:

A partir deste ponto de operação “A” deseja-se aumentar a tensão no secundário do equipamento chegando-se numa condição de operação “B”. Para isto, estabelece-se uma corrente $I_{sat1} > 0$. Esta corrente dará origem a um fluxo magnético Φ_{sat1} que tende a aumentar a relutância do equipamento no braço esquerdo segundo a Figura 6. Isto fará com que Φ_{2a-1} diminua em relação à condição de operação “A” e ao mesmo tempo Φ_{2b-1} aumenta, pois Φ_1 não muda. Se, por construção $N_{2b} > N_{2a}$ então a tensão no secundário será maior na condição de operação “B” em relação à condição de operação “A”.

Condição C – redução de tensão na saída do equipamento:

Da mesma maneira, pode-se diminuir a tensão no secundário do equipamento em relação à condição de operação “A”, chegando-se à condição “C”. Para isso, estabelece-se uma corrente $I_{sat2} > 0$. Esta corrente dará origem a um fluxo magnético Φ_{sat2} que tende a aumentar a relutância do equipamento no braço direito segundo a Figura 6. Isto fará com que Φ_{2b-1} diminua em relação à condição de operação “A” e ao mesmo tempo Φ_{2a-1} aumenta, pois Φ_1 não muda. Se, por construção $N_{2b} > N_{2a}$ então a tensão no secundário será menor na condição de operação “C” em relação à condição de operação “A”.

Utilizando o protótipo construído de modo que: $N_{2a} = 2N_{2b} = 2N_1 = 1600$ espiras, tem-se, segundo as Equações (3) e (4), as condições de operação exibidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Topologia 1 – funcionamento teórico em vazio

E_1	I_{sat1}	I_{sat2}	Φ_1	Φ_{2a-1}	Φ_{2b-1}	E_C
220 V	0 A	0 A	1,0323E-3 Wb	5,1614E-4 Wb	5,1614E-4 Wb	330 V
220 V	2 A	0 A	1,0323E-3 Wb	0 Wb	1,0323E-3 Wb	220 V
220 V	0 A	2 A	1,0323E-3 Wb	1,0323E-3 Wb	0 Wb	440 V

Portanto a regulação na saída varre uma faixa de:

$$220V \leq E_C \leq 440V$$

5.3.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO COM A TOPOLOGIA 1 E OBSERVAÇÕES

A montagem feita em laboratório para o ensaio desta topologia, está representada na Figura 21. Para os ensaios que se sucederam foram utilizados os seguintes equipamentos:

- um variac para a alimentação gradativa do equipamento, assim como para fixar 220 V na entrada do protótipo, pois em algumas situações a tensão entre fases da rede elétrica superava o valor de 220 V dada a presença de distorções da forma de onda da tensão causada pela não linearidades das cargas eletrônicas;
- uma fonte DC linear e regulada com duas saídas independentes para acionamento de ambos os pares de bobinas N_{CC} . Esta fonte possui um mostrador que permite a identificação das correntes I_{sat1} e I_{sat2} entregues ao circuito;
- um osciloscópio de 4 canais que permite medir as formas de onda das tensões induzidas dos dois enrolamentos secundários E_{2a} e E_{2b} , assim como a tensão que é entregue à carga E_C ;
- uma caixa de resistências associada em série com um reostato para fazer o papel de uma carga resistiva que é alimentada pelo protótipo. O reostato varia sua resistividade na faixa de $0\ \Omega$ a $60\ \Omega$, enquanto que a caixa de resistências assume valores discretos múltiplos de $127\ \Omega$.

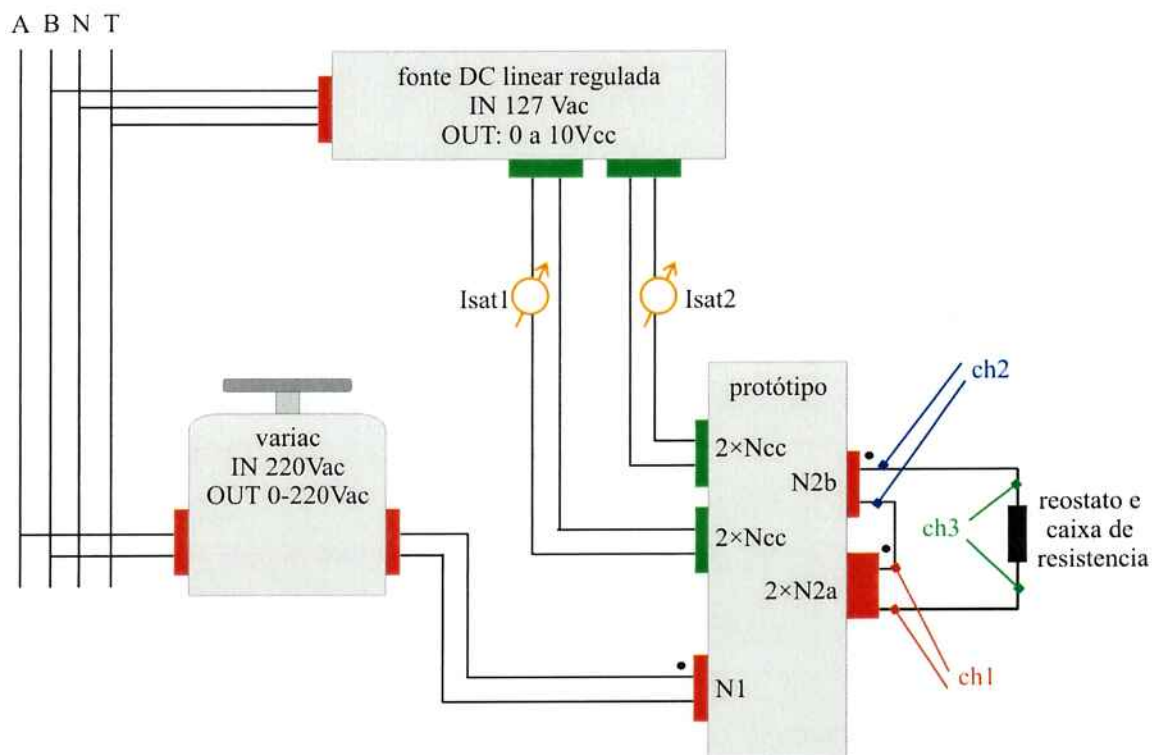


Figura 21 – Topologia 1 – montagem em laboratório

Inicialmente efetuou-se o ensaio em vazio do protótipo. Na prática, como as variações de I_{sat1} e I_{sat2} são contínuas, a variação de E_C também é contínua. Ao mesmo tempo, não se pode dizer que E_C varia sempre linearmente com I_{sat1} ou I_{sat2} , pois existe a presença do fenômeno de saturação do núcleo ferromagnético que impede esta linearidade.

A Figura 22 corresponde aos dados levantados em laboratório para a condição de operação em vazio. Destaca-se que as variações de I_{sat1} e I_{sat2} foram feitas independentemente, isto é, a curva que corresponde a I_{sat1} foi levantada para $I_{sat2} = 0$ A, enquanto que a curva correspondente a I_{sat2} foi levantada para $I_{sat1} = 0$ A.

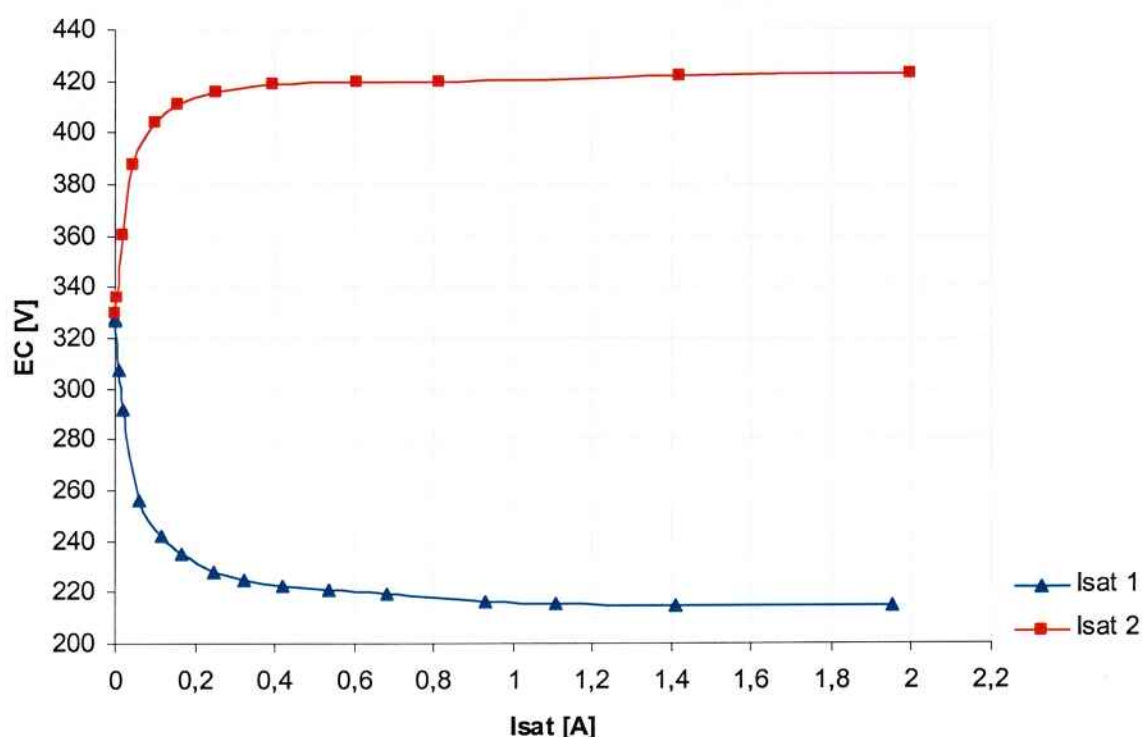


Figura 22 - Topologia 1 – ensaio experimental em vazio – valores em RMS

Experimentalmente, o que se observou foi uma grande aproximação dos valores alcançados para a condição em que o equipamento encontrava-se em vazio como exposto na Tabela 4.

Os erros pequenos ocorrem em função do aparecimento dos fluxos de dispersão fruto da permeabilidade finita do núcleo.

Porém, ao se conectar ao secundário alguma carga resistiva, percebeu-se uma altíssima regulação, fazendo com que a tensão E_C reduzisse consideravelmente. Mesmo aplicando os

procedimentos de regulação exposto anteriormente, não se conseguiu uma regulação minimamente aceitável para cargas que consumiriam correntes resistivas da ordem de 0,5A.

Tabela 4 – Topologia 1 – verificação dos resultados

E_C teórico	E_C medido	ΔE_C
330 V	328 V	2 V
220 V	214,6 V	5,4 V
440 V	422 V	18 V

A busca por uma explicação do fenômeno de alta regulação observado remeteu a uma análise mais profunda do circuito magnético. Desta vez foi imprescindível mapear-se os fluxos magnéticos de reação (dos enrolamentos secundários) assim como os fluxos magnéticos de dispersão. A Figura 23 ilustra o comportamento dos fluxos magnéticos e seus acoplamentos para o caso em que I_1 é positivo e $N_{2a} = 2N_{2b} = 2N_1$.

A circulação de corrente pelos enrolamentos secundários faz com que além da força magnetomotriz desenvolvida pelo produto I_1N_1 , apareçam outras duas forças magnetomotriz desenvolvidas pelos produtos I_2N_{2a} e I_2N_{2b} , alocadas fisicamente nos braços esquerdo e direito respectivamente.

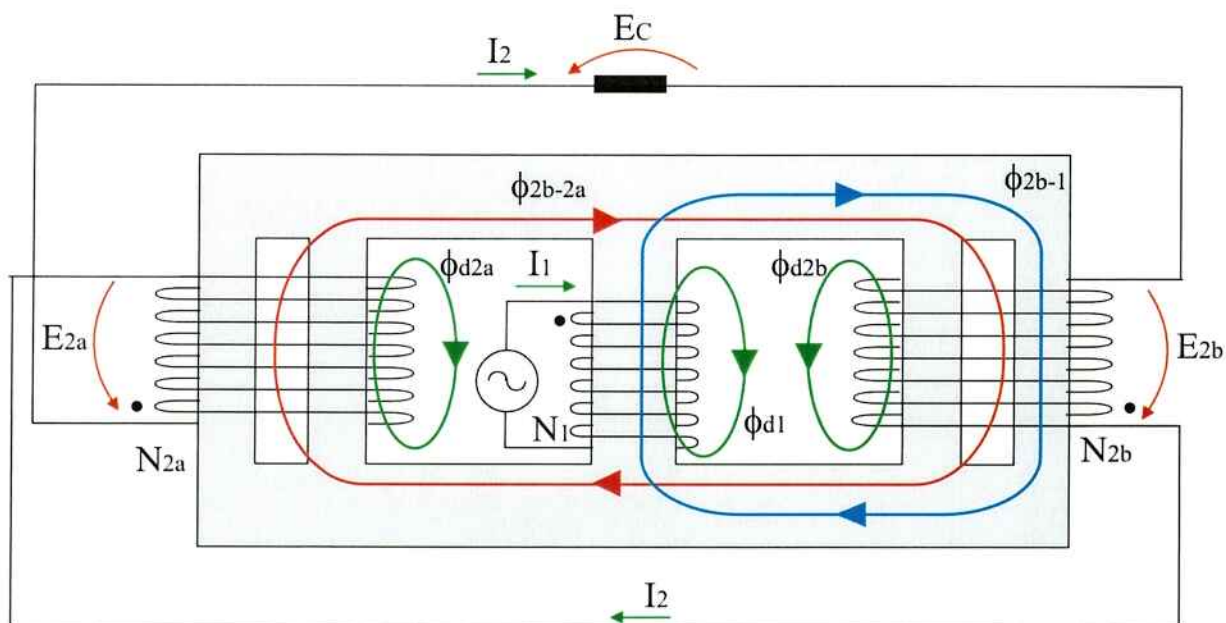


Figura 23 – Topologia 1 – funcionamento em carga

Pela Equação (4), para:

$$E_C \approx 0V \Rightarrow E_{2a} \approx -E_{2b}$$

Os ensaios em laboratório permitiram identificar este fenômeno, pois colocando o equipamento em carga, à tensão medida em E_{2a} acrescentou-se uma defasagem de 180° para um módulo de E_{2a} praticamente igual a E_{2b} .

O fato é que a circulação de uma pequena corrente I_2 pelo enrolamento N_{2a} cria uma força magnetomotriz capaz de produzir um fluxo magnético Φ_{2b-2a} que vence a parcela do fluxo magnético que, em vazio, percorria do enrolamento primário N_1 para o secundário N_{2a} como representado na Figura 19 pelo fluxo Φ_{2a-1} . Ao mesmo tempo o fluxo magnético que se fecha pelo enrolamento direito N_{2b} aumenta, pois é composto por uma parcela referente ao acoplamento com o enrolamento primário N_1 e outra parcela referente ao acoplamento com o enrolamento secundário N_{2a} . Sendo assim há uma inversão de sentido do fluxo magnético que se fecha pelo braço esquerdo do equipamento, fazendo com que E_{2a} mude seu sinal e confronte-se destrutivamente com E_{2b} causando uma redução considerável da tensão E_C .

Nesta condição, surgem também os fluxos magnéticos de dispersão, que estão representados na Figura 23 na cor verde. Estes fluxos de dispersão são frutos da permeabilidade finita do núcleo ferromagnético, o qual não confina todo o fluxo magnético produzido pelos enrolamentos primários e secundários em seu interior. Soma-se a isto o fato de que, nesta configuração, os enrolamentos primário e secundário estão separados em braços distintos do protótipo, tornando a operação em carga mais suscetível ao aparecimento de fluxos de dispersão.

É complexo determinar quantitativamente os valores exatos dos fluxos magnéticos analisados anteriormente quando o equipamento é colocado em carga. O que se procurou foi fazer uma interpretação qualitativa fundamenta nas leis do eletromagnetismo e nos fenômenos observados e medidos.

Para melhor ilustrar e justificar as afirmações feitas acima, algumas formas de onda de tensão são apresentadas e comentadas. A partir da condição em vazio (Figura 24) o equipamento é

colocado em carga (Figura 25) para $I_{sat1} = I_{sat2} = 0$ A. Neste momento identifica-se que a tensão E_C sofre uma considerável queda.

Segundo a Tabela 3, a imposição de I_{sat2} promove um aumento da tensão E_C quando o equipamento opera em vazio. Do mesmo modo, a imposição de I_{sat2} para o equipamento operando em carga também aumenta a tensão E_C (Figura 27), porém a relação destrutiva de E_{2a} com E_{2b} impede que E_C seja sequer próximo dos 440V esperados, permanecendo em aproximadamente $(110/\sqrt{2})$ V. A imposição de I_{sat1} , que deveria reduzir a tensão E_C na saída do equipamento (como ocorre quando o protótipo opera em vazio), também a eleva (Figura 26). Este comportamento às avessas em relação à operação em vazio ocorre devido à nova composição dos fluxos variacionais dentro do equipamento. A tentativa de manipular os fluxos magnéticos variacionais representados na Figura 23 resulta numa redução da tensão induzida nos secundários (E_{2a} e E_{2b}) devido a circuitação dos fluxos Φ_{2b-2a} e Φ_{2a-1} , pois um aumento de relutância dos braços laterais dos equipamento, através da imposição de I_{sat1} ou I_{sat2} tenderá a dificultar a passagem dos fluxos variacionais. No entanto, ao mesmo tempo, aparece uma defasagem diferente de 180° elevando a tensão E_C . Apesar desta elevação, os valores de E_C não atingem, ao menos, 220 V para uma carga que consome em torno de 0,5A. Sendo assim, esta topologia elétrica 1 não é interessante do ponto de vista funcional.

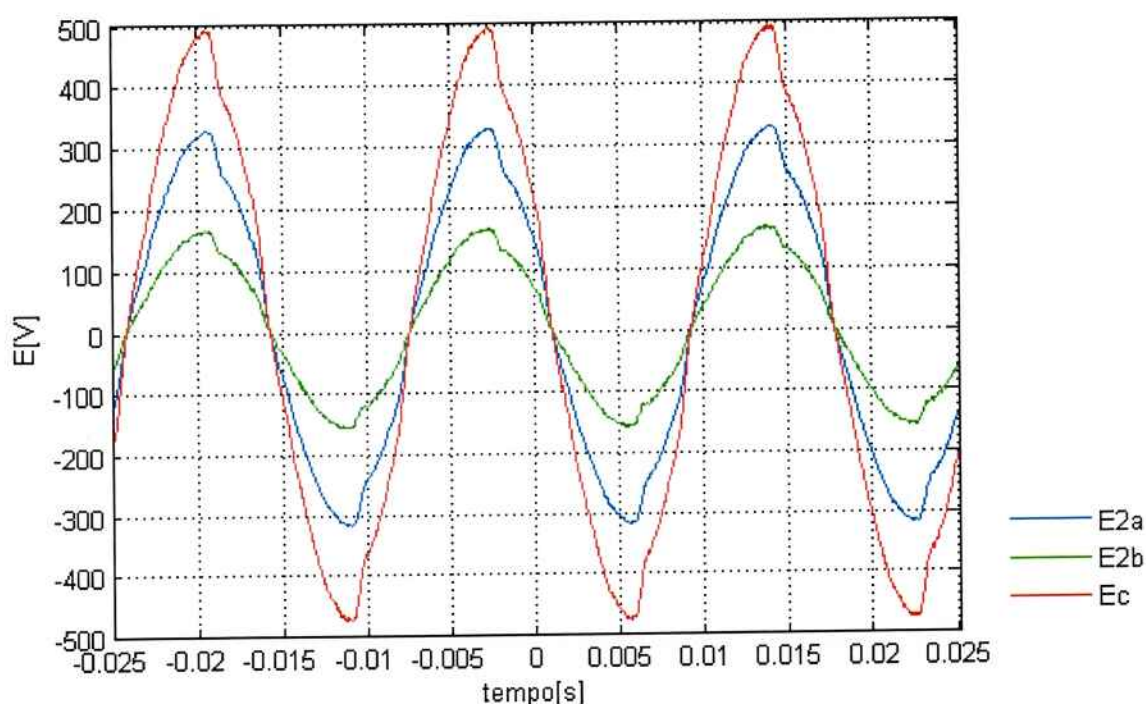


Figura 24 – Topologia 1 – operação em vazio ($I_{sat1}=0$ A, $I_{sat2}=0$ A)

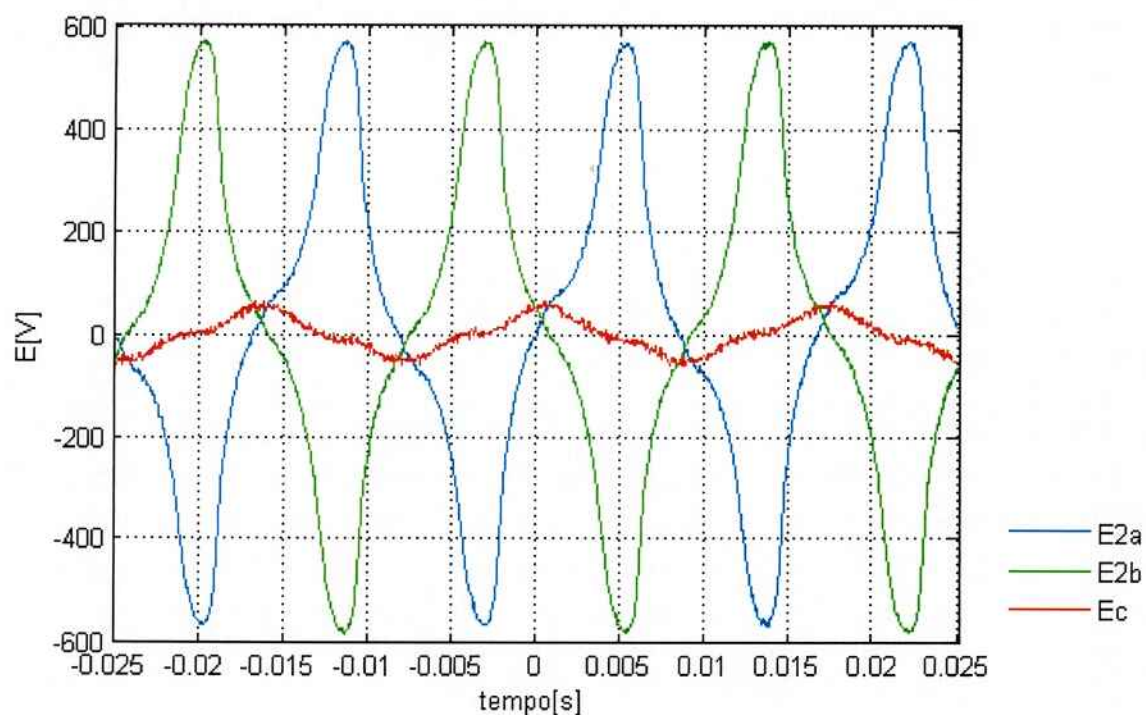


Figura 25 – Topologia 1 – operação em carga ($I_{\text{sat1}}=0A$, $I_{\text{sat2}}=0A$)

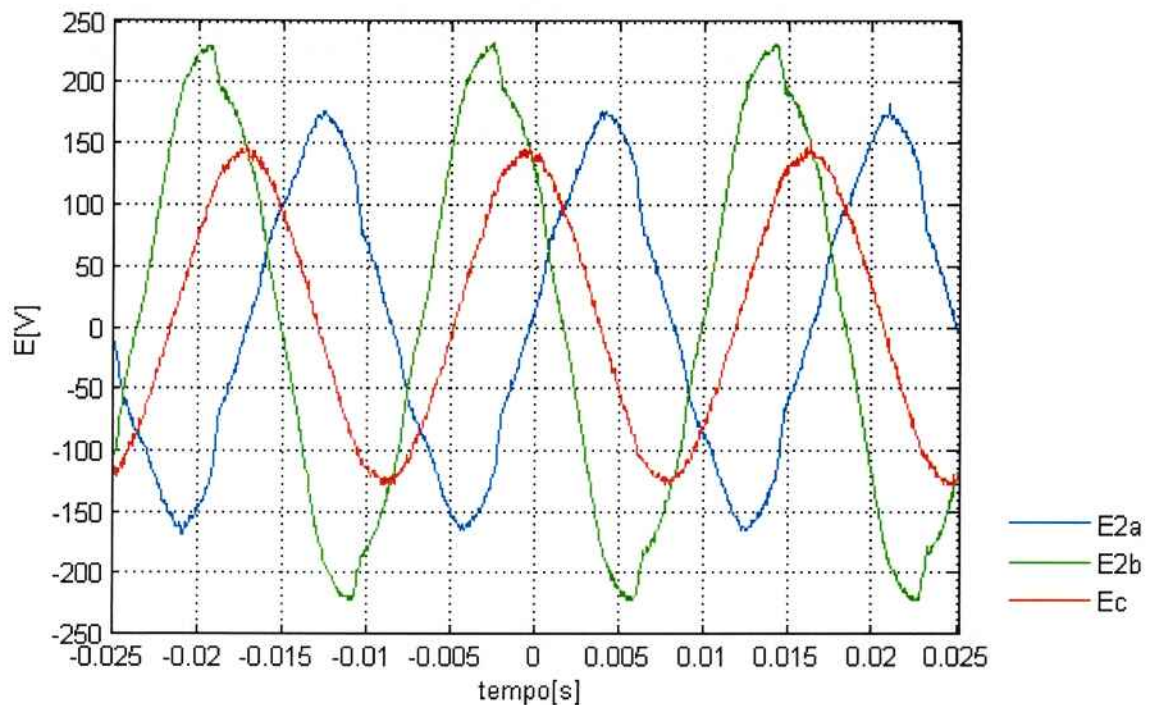


Figura 26 – Topologia 1 – operação em carga ($I_{\text{sat1}}=1A$, $I_{\text{sat2}}=0A$)

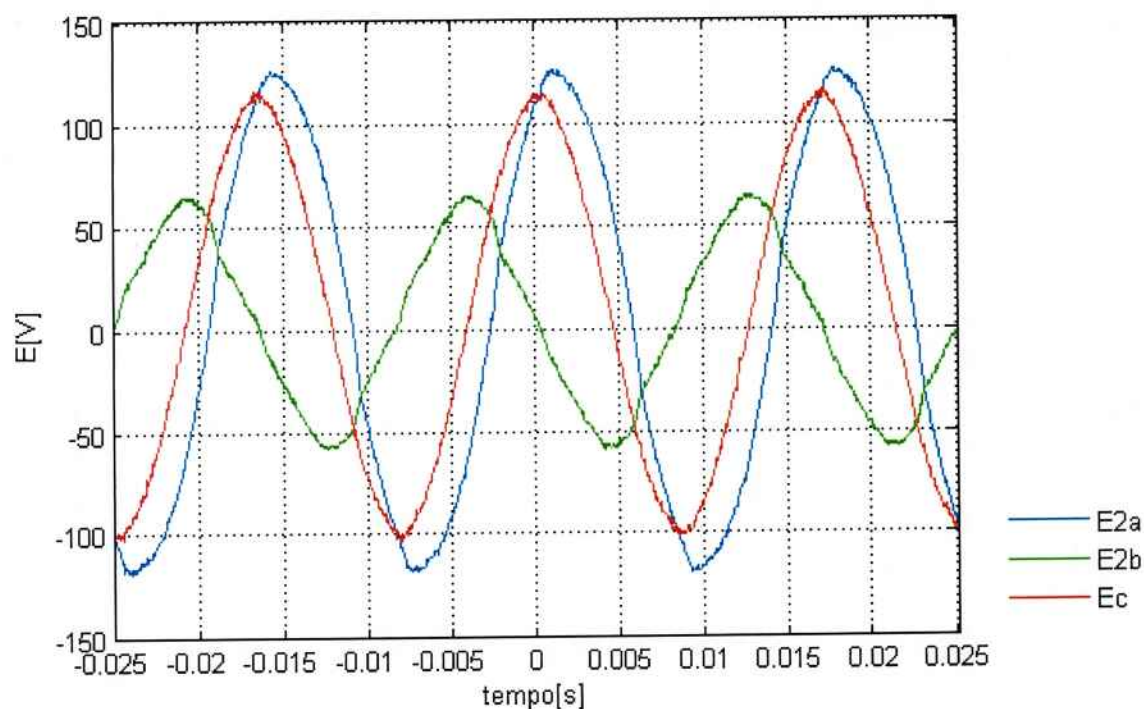


Figura 27 – Topologia 1 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=1A$)

5.4 TOPOLOGIA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA 2 – AUTOTRANSFORMADOR COM DOIS ENROLAMENTOS SÉRIE

5.4.1 ESTUDO DE FUNCIONAMENTO

A partir da Figura 7 pode-se conectar eletricamente as bobinas do secundário e do primário de modo a operar o equipamento como um autotransformador. A representação das ligações é esquematizada na Figura 28.

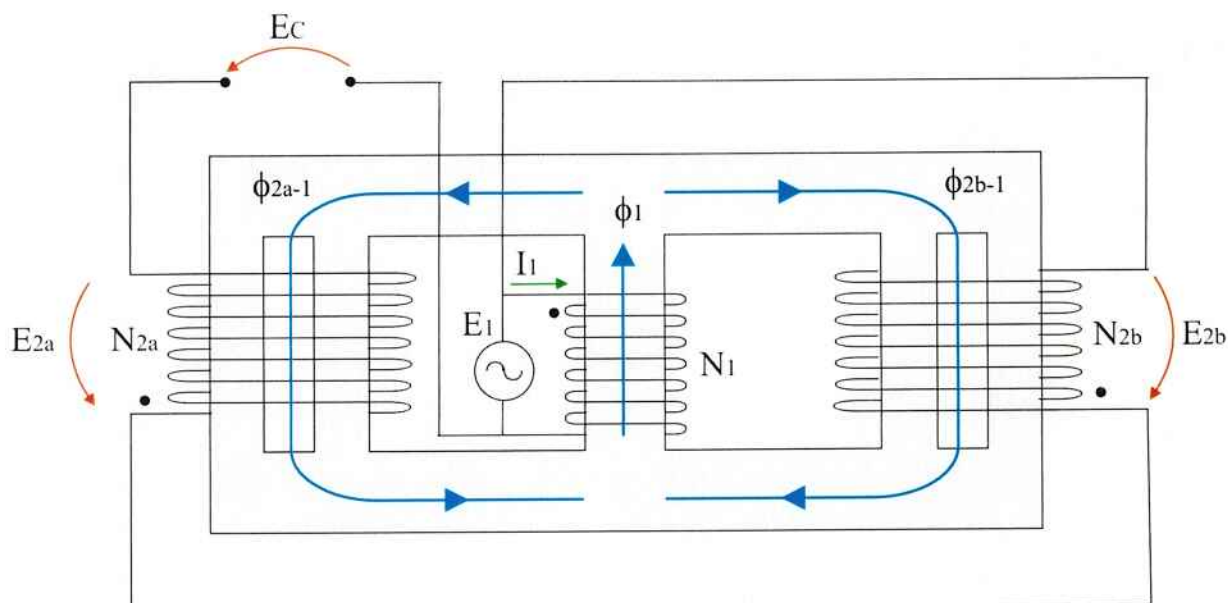


Figura 28 – Topologia 2 – funcionamento em vazio

Nota-se que primário e secundário não estão eletricamente isolados, pois existe um terminal comum entre eles. Sendo assim em sua saída haverá uma tensão E_C dada por:

$$E_C = E_1 - E_{2a} + E_{2b} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_1 - 4,44 \cdot f \cdot N_{2a} \cdot \Phi_{2a-1} + 4,44 \cdot f \cdot N_{2b} \cdot \Phi_{2b-1} \quad (5)$$

Como autotransformador, a regulação de tensão não necessita de secundários que possuam suas bobinas com diferentes quantidades de espiras como acontecia na topologia de ligação elétrica 1 (transformador isolado). A regulação fundamenta-se na combinação da tensão E_1 com as tensões E_{2a} , que se origina a partir do fluxo Φ_{2a-1} , e E_{2b} , que se origina a partir do fluxo Φ_{2b-1} , sendo que o controle do valor de Φ_{2a-1} e Φ_{2b-1} também é feito pelas bobinas de corrente contínua.

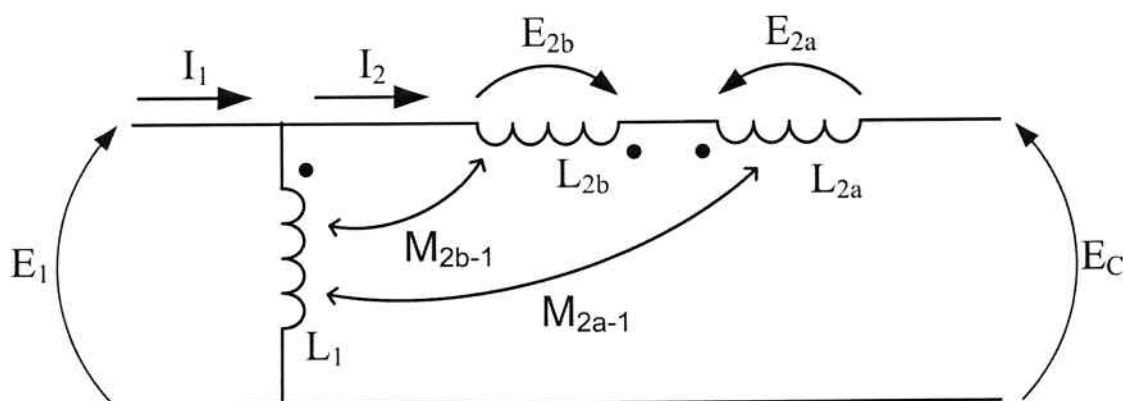


Figura 29 – Topologia 2 – circuito elétrico

O circuito elétrico representado por indutâncias mútuas e próprias desta topologia está esquematizado na Figura 29. Destaca-se que não estão representadas na Figura 29 as resistências dos enrolamentos de cobre.

Uma primeira análise superficial do funcionamento do equipamento em vazio ($I_2 = 0A$), sem levar em conta as perdas e dispersões, pode ser feita da maneira como colocado abaixo:

Condição A – tensão nominal na saída do equipamento:

Para uma condição “A” de operação do equipamento, as bobinas de corrente contínua estão desligadas. Sendo assim, o fluxo magnético Φ_1 divide-se igualmente para cada lado do equipamento $\Phi_{2a-1} = \Phi_{2b-1} = \Phi_1/2$. Como $N_{2a} = N_{2b}$, então $E_{2a} = E_{2b}$, fazendo com que na saída do autotransformador haja uma tensão $E_C = E_1$.

Condição B – aumento de tensão na saída do equipamento:

A partir deste ponto de operação “A” deseja-se aumentar a tensão no secundário do equipamento chegando-se numa condição de operação “B”. Para isto, estabelece-se uma corrente $I_{sat1} > 0$. Esta corrente dará origem a um fluxo magnético Φ_{sat1} que tende a aumentar a relutância do equipamento no braço esquerdo segundo a Figura 6. Isto fará com que Φ_{2a-1} diminua em relação à condição de operação “A” e ao mesmo tempo Φ_{2b-1} aumente, pois Φ_1 não muda. Como $N_{2a} = N_{2b}$, então $E_{2a} < E_{2b}$, portanto E_C na condição “B” será maior do que na condição “A”.

Condição C – redução de tensão na saída do equipamento:

A partir deste ponto de operação “A” deseja-se diminuir a tensão no secundário do equipamento chegando-se numa condição de operação “C”. Para isto, estabelece-se uma corrente $I_{sat2} > 0$. Esta corrente dará origem a um fluxo magnético Φ_{sat2} que tende a aumentar a relutância do equipamento no braço direito segundo a Figura 6. Isto fará com que Φ_{2b-1} diminua em relação à condição de operação “A” e ao mesmo tempo Φ_{2a-1} aumente pois Φ_1 não muda. Como $N_{2a} = N_{2b}$, então $E_{2a} > E_{2b}$, portanto E_C na condição “C” será menor do que na condição “A”.

Utilizando o protótipo construído de modo que: $N_{2a} = N_{2b} = N_1 = 800$ espiras, tem-se, segundo as Equações (3) e (5), as condições de operação exibidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Topologia 2 – funcionamento teórico em vazio

E_1	I_{sat1}	I_{sat2}	Φ_1	Φ_{2a-1}	Φ_{2b-1}	E_C
220 V	0 A	0 A	1,0323E-3 Wb	5,1614E-4 Wb	5,1614E-4 Wb	220 V
220 V	2 A	0 A	1,0323E-3 Wb	0 Wb	1,0323E-3 Wb	440 V
220 V	0 A	2 A	1,0323E-3 Wb	1,0323E-3 Wb	0 Wb	0 V

Portanto a regulação na saída varre uma faixa de:

$$0V \leq E_C \leq 440V$$

5.4.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO E OBSERVAÇÕES

A montagem feita em laboratório para o ensaio desta topologia, está representada na Figura 30. Os equipamentos utilizados para as medições foram idênticos ao utilizado para os ensaios efetuados com a topologia 1 (transformador isolador).

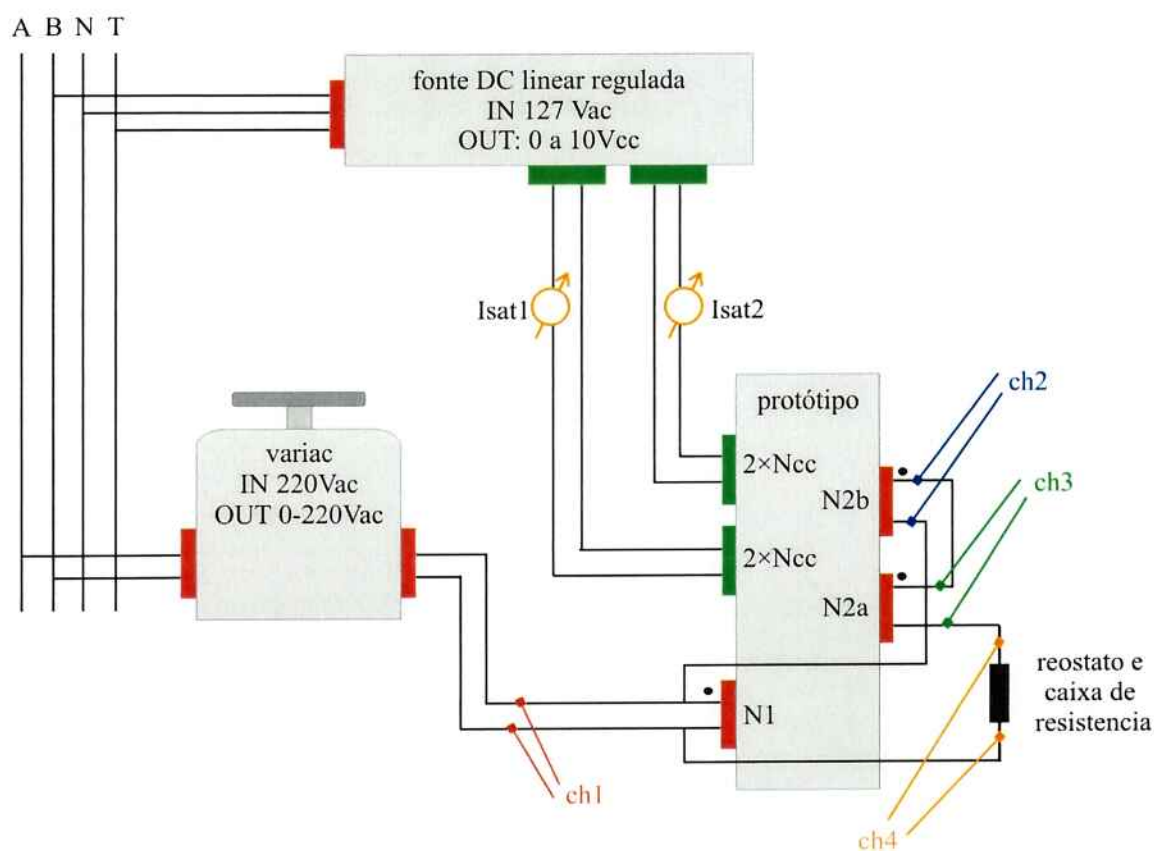


Figura 30 – Topologia 2 – montagem em laboratório

Na prática, como a variação de I_{sat1} e I_{sat2} é contínua, a variação de E_C também é contínua. Ao mesmo tempo, não se pode dizer que E_C varia sempre linearmente, pois existe a presença do fenômeno de saturação do núcleo ferromagnético que impede esta linearidade.

A Figura 31 corresponde aos dados levantados em laboratório para a condição de operação em vazio. Destaca-se que a variação de I_{sat1} e I_{sat2} foram feitas independentemente, isto é, a curva que correspondente a I_{sat1} foi levantada para $I_{sat2} = 0$ A, enquanto que a curva correspondente a I_{sat2} foi levantada para $I_{sat1} = 0$ A.

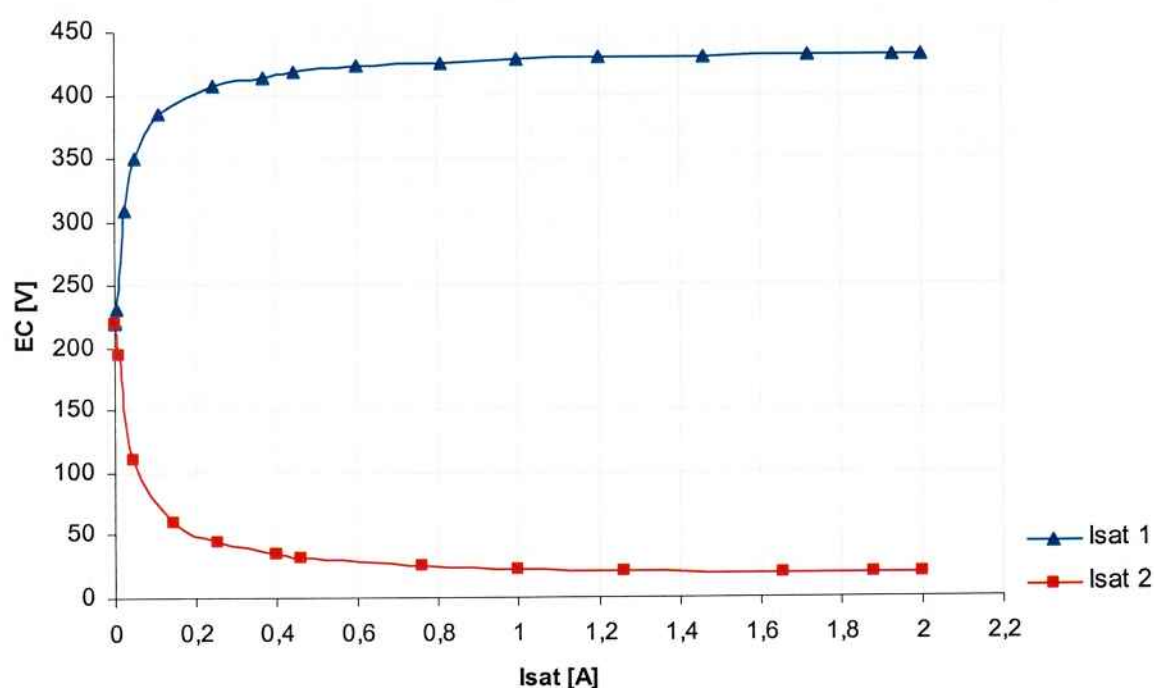


Figura 31 – Topologia 2 – ensaio experimental em vazio

Experimentalmente, o que se observou foi uma grande aproximação dos valores alcançados para a condição em que o equipamento encontrava-se em vazio como exposto na Tabela 6. Os erros pequenos ocorrem em função do aparecimento dos fluxos de dispersão fruto da permeabilidade finita do núcleo.

Tabela 6 – Topologia 2 – verificação dos resultados

E_C teórico	E_C medido	ΔE_C
220 V	220 V	0 V
440 V	431,4 V	8,6 V
0 V	18,7 V	18,7 V

Porém, ao conectar ao secundário alguma carga resistiva, percebeu-se uma altíssima regulação, fazendo com que a tensão E_C chegasse muito próxima a zero. Mesmo aplicando os procedimentos de regulação exposto anteriormente, não se conseguiu uma regulação minimamente aceitável para cargas que consumiriam correntes resistivas da ordem de 0,5A.

Para explicar o fenômeno observado, teve-se que recorrer a um estudo mais aprofundado do circuito magnético, mapeando-se as interações dos fluxos magnéticos produzido pelo primário com os fluxos magnéticos de reação produzidos pela passagem de I_2 nos enrolamentos secundários juntamente com os fluxos magnéticos de dispersão.

Um equipamento transformador de tensão convencional que utiliza o meio magnético para transferir energia, pressupõe que o fluxo magnético mútuo, entre primário e secundário, seja o resultado da combinação do fluxo magnético desmagnetizante do secundário com o fluxo magnético magnetizante do primário. A Figura 32 ilustra este comportamento através da representação dos fluxos magnéticos de dispersão, cuja direção e sentido revelam que:

- no primário, Φ_{d1} colabora com Φ_m e, portanto, a tendência do fluxo magnético produzido por E_1 ($\Phi_{d1} + \Phi_m$) é magnetizante;
- no secundário, Φ_{d2} não colabora com Φ_m e, portanto, a tendência do fluxo magnético de reação produzido por E_C ($\Phi_{d2} - \Phi_m$) é desmagnetizante.

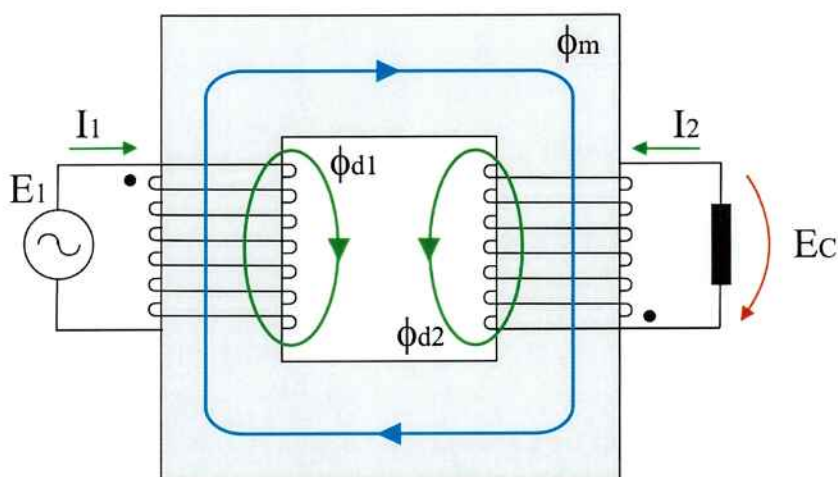


Figura 32 – Equipamento transformador convencional

O fato é que para a topologia 2 (autotransformador) estudada, o fluxo de reação do produzido pelo secundário N_{2a} não é desmagnetizante. Pela regra da mão direita, nota-se que a passagem de corrente pelo enrolamento N_{2a} produz um fluxo magnético que concorda com o fluxo

magnético provindo do enrolamento primário Φ_{2b-1} . Este comportamento é mostrado pela Figura 33.

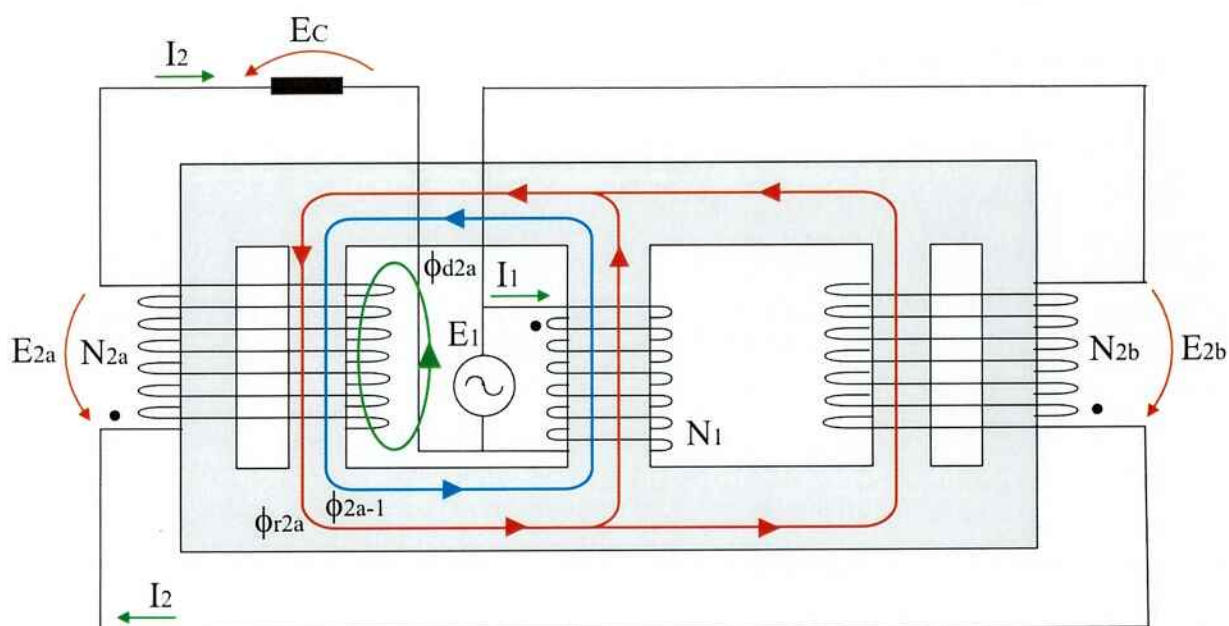


Figura 33 – Topologia 2 – funcionamento em carga

Sendo assim, do ponto de vista prático, o fluxo de reação Φ_{r2a} , que deveria dar origem ao fluxo de dispersão Φ_{d2a} que se circuitaria unicamente pelo ar, na realidade, encontra um caminho de circuitação pelo próprio material ferromagnético onde a relutância é significativamente mais baixa. Isto se reflete no circuito elétrico como uma altíssima reatância de dispersão presente no enrolamento N_{2a} do braço esquerdo. Portanto, o fluxo de reação Φ_{r2a} se comporta como um fluxo magnético de dispersão de N_{2a} cuja circuitação é feita pelo núcleo ferromagnético.

Por outro lado, a parcela do fluxo magnético Φ_{r2a} que se fecha pelo braço direito do equipamento é desmagnetizante, em relação ao fluxo magnético mútuo Φ_{2b-1} (representado na Figura 28). Isto provoca uma queda de E_{2b} .

Voltando-se ao circuito equivalente representado na Figura 29, ao se colocar o equipamento em carga, o que se terá na prática é um aumento de tensão E_{2a} e uma diminuição da tensão E_{2b} . O resultado global disso é uma tensão E_C reduzida comparada a uma situação em que o equipamento encontra-se operando em vazio.

Para melhor ilustrar e justificar as afirmações feitas acima, algumas formas de onda de tensão são apresentadas e comentadas. A partir da condição em vazio (Figura 34) o equipamento é

colocado em carga (Figura 35) para $I_{sat1} = I_{sat2} = 0$ A. Neste momento identifica-se que a tensão E_C sofre uma considerável redução.

Segundo a Tabela 5, a imposição de I_{sat1} promove um aumento da tensão E_C quando o equipamento opera em vazio. O ensaio evidenciou que I_{sat1} também eleva a tensão quando o equipamento alimenta uma carga, como mostra a Figura 36. De fato, o fluxo magnético gerado pela corrente I_{sat1} eleva a relutância do braço esquerdo do transformador, fazendo com que o fluxo Φ_{2b-1} (esquemmatizado na Figura 28) eleve-se e, Φ_{2a-1} reduza-se. Automaticamente, tem-se uma elevação da tensão E_{2b} , uma redução da tensão E_{2a} , resultando em um aumento da tensão E_C . Já a imposição de I_{sat2} (Figura 37) não provoca substancial mudança em relação à condição em carga e que $I_{sat1} = I_{sat2} = 0$ A. Isto ocorre pois o fluxo magnético provocado por I_{sat2} inibe a passagem do fluxo Φ_{2b-1} , essencial para a elevação de E_{2b} e de E_C .

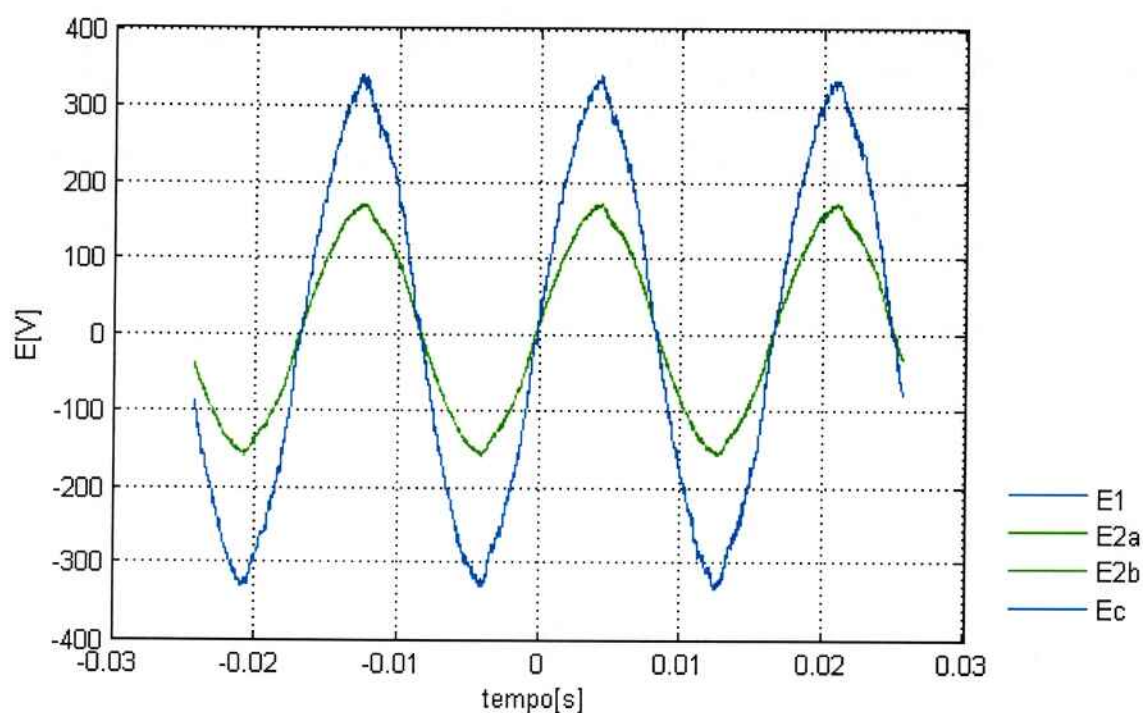


Figura 34 – Topologia 2 – operação em vazio ($I_{sat1}=0$ A, $I_{sat2}=0$ A)

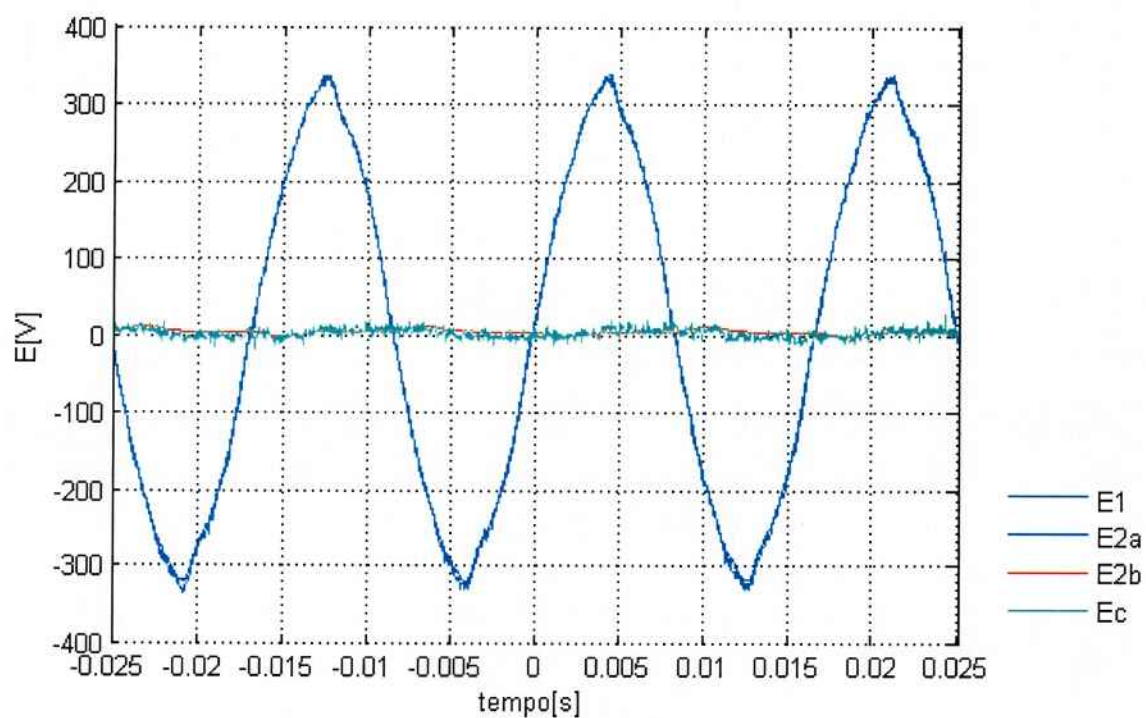


Figura 35 – Topologia 2 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=0A$)

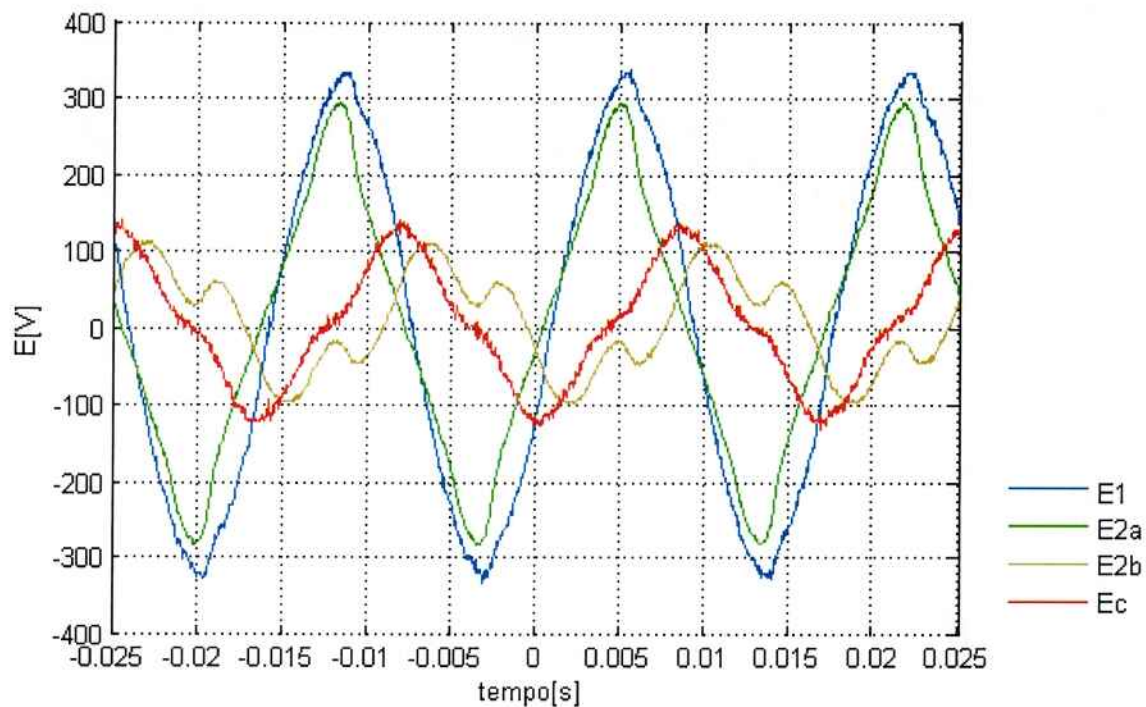


Figura 36 – Topologia 2 – operação em carga ($I_{sat1}=1A$, $I_{sat2}=0A$)

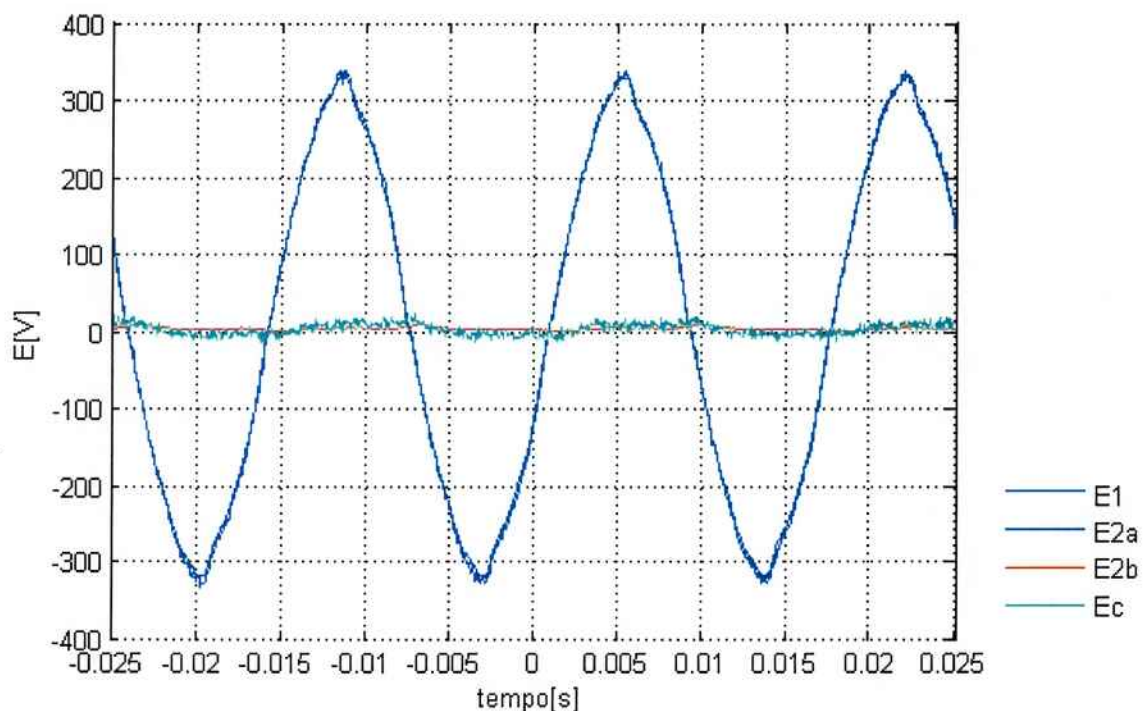


Figura 37 – Topologia 2 – operação em carga ($I_{sat1}=0A$, $I_{sat2}=1A$)

5.5 TOPOLOGIA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA 3 – AUTOTRANSFORMADOR COM UM ENROLAMENTO SÉRIE

5.5.1 ESTUDO DE FUNCIONAMENTO

A partir da Figura 7 pode-se conectar eletricamente uma bobina do secundário e outra do primário de modo a operar o equipamento como um autotransformador com um único enrolamento série. A representação das ligações é esquematizada na Figura 38.

Inicialmente, nota-se que o primário e secundário não estão eletricamente isolados, pois existe um terminal comum entre eles. Sendo assim, na saída do equipamento haverá uma tensão E_C dada pela Equação (6).

$$E_C = E_1 + E_{2a} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_1 + 4,44 \cdot f \cdot N_{2a} \cdot \Phi_{2a-1} \quad (6)$$

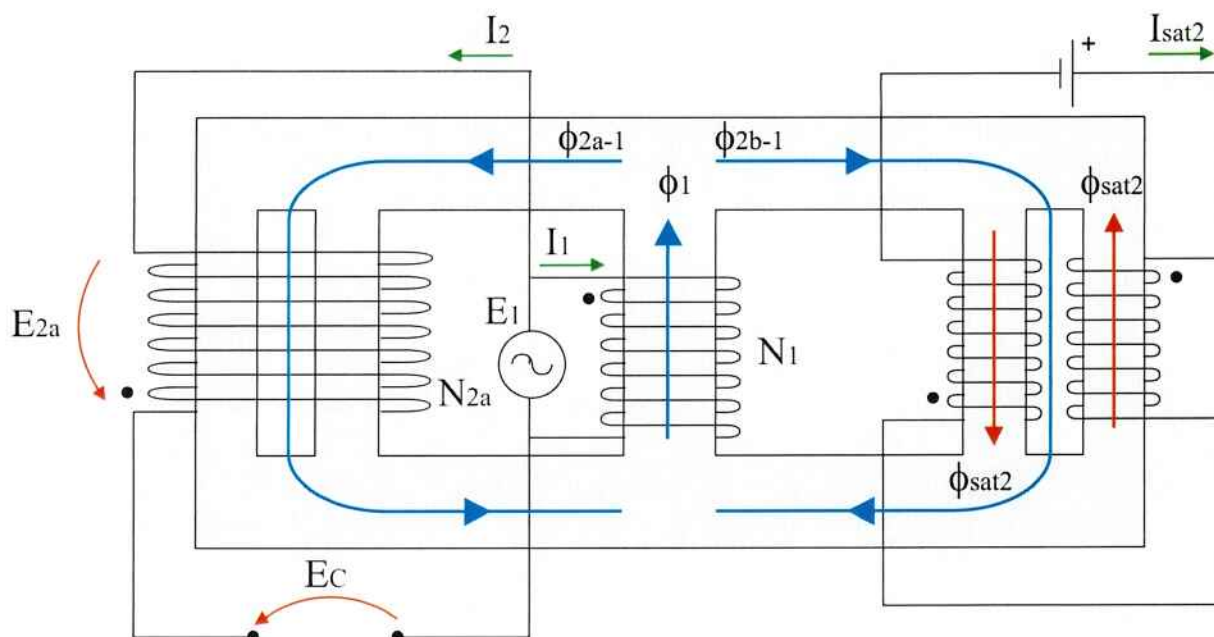


Figura 38 – Topologia 3 – funcionamento em vazio

O procedimento de funcionamento é exposto na seqüência.

Partindo de uma situação de operação em vazio em que I_2 e I_{sat2} são nulos, o fluxo magnético variacional Φ_1 total produzido por E_1 se dividirá pela metade para cada braço lateral do equipamento, fazendo com que E_{2a} possua metade do módulo de E_1 e, conseqüentemente, E_C possua o valor de $(3/2)E_1$. Partindo-se deste ponto, ao se aumentar I_{sat2} , o fluxo magnético produzido por E_1 não mais se dividirá exatamente pela metade para cada braço lateral. Isto ocorre porque o fluxo magnético constante Φ_{sat2} criado pela circulação I_{sat2} faz com que a relutância no braço direito do equipamento aumente, forçando o fluxo magnético variacional a se fechar pelo lado esquerdo, melhorando a concatenação de fluxo magnético Φ_{2a-1} entre N_1 e N_{2a} , provocando assim um aumento relativo de E_{2a} e, conseqüentemente da tensão E_C .

Quando I_2 deixa de ser nulo, isto é, quando o equipamento é colocado em carga, o fluxo magnético de reação criado pela circulação de I_2 tende desmagnetizar o núcleo num primeiro momento transitório. Quando esta desmagnetização é sentida pelo primário, a corrente I_1 aumenta na tentativa de suprir a desmagnetização causada pela circulação de I_2 .

Devido às dispersões e perdas inerentes aos componentes reais e à topologia do equipamento, em que primário e secundário se instalam em braços separados, não existe uma recomposição completa do fluxo magnético mútuo fazendo com que E_{2a} em carga seja menor que E_{2a} em vazio.

Partindo do pressuposto que o fluxo magnético de dispersão do enrolamento primário N_1 é a parcela de fluxo variacional que não se concatena com o enrolamento do secundário N_{2a} , pode-se dizer que, segundo a Figura 39, o fluxo magnético de dispersão total do enrolamento primário é dado por:

$$\Phi_{d1total} = \Phi_{d1} + \Phi_{2b-1} \quad (7)$$

Como o braço direito do equipamento regula a quantidade de fluxo magnético Φ_{2b-1} através da imposição de I_{sat2} , infere-se que o fluxo magnético de dispersão total $\Phi_{d1total}$ varia com I_{sat2} . Esta regulação do fluxo de dispersão do primário é feita através do acionamento das bobinas de corrente contínua, que impõem ao braço direito do equipamento uma condição de maior ou menor permeabilidade magnética, tornando o braço esquerdo um caminho mais ou menos favorável para o fluxo magnético variacional Φ_1 .

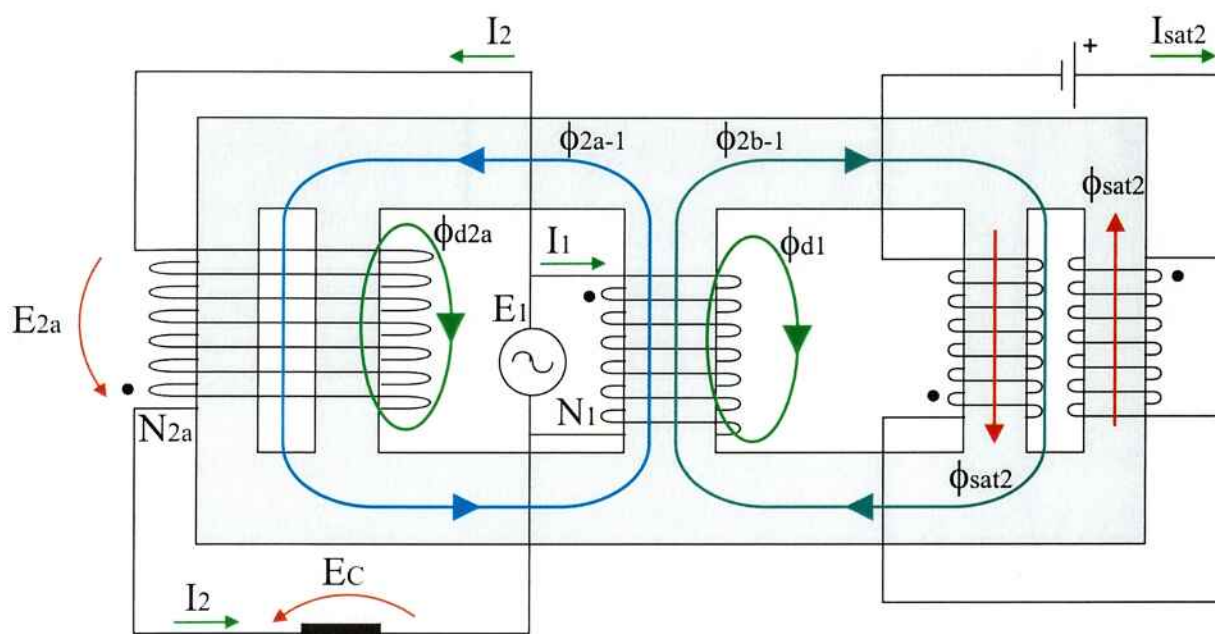


Figura 39 – Topologia 3 – funcionamento em carga

Em outras palavras, através do acionamento de I_{sat2} existe a possibilidade de se alterar a indutância de dispersão série do enrolamento primário e, automaticamente, de se controlar a tensão imposta à carga E_C .

Se I_{sat2} é suficientemente grande para inibir a passagem do fluxo gerado por E_1 pelo braço direito, o acoplamento magnético existente entre os enrolamentos do primário e secundário será melhorado. Sendo assim, consegue-se controlar o valor de E_C conforme a variação de I_{sat2} .

O circuito elétrico representado por indutâncias mútuas e próprias desta topologia está esquematizado na Figura 40. Destaca-se que não estão representadas na Figura 40 as resistências dos enrolamentos de cobre.

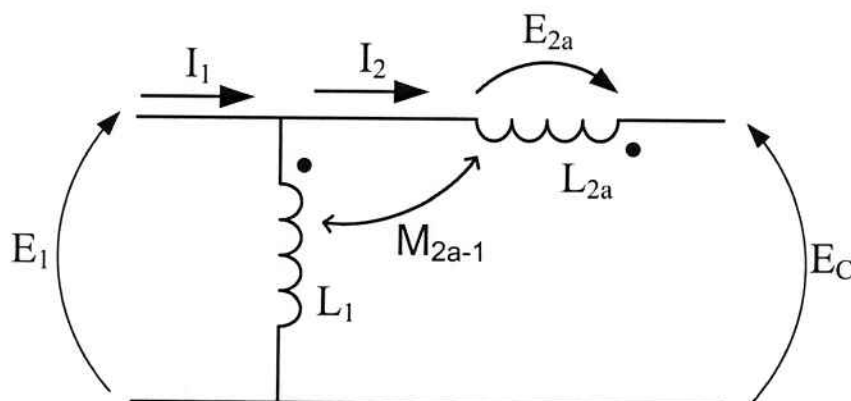


Figura 40 – Topologia 3 – circuito elétrico

Utilizando o protótipo construído de modo que: $N_{2a} = N_1 = 800$ espiras, tem-se, segundo as Equações (3) e (6), as condições de operação exibidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Topologia 3 – funcionamento teórico em vazio

E_1	I_{sat1}	I_{sat2}	Φ_1	Φ_{2a-1}	Φ_{2b-1}	E_C
220 V	-	0 A	1,0323E-3 Wb	5,1614E-4 Wb	5,1614E-4 Wb	330 V
220 V	-	2 A	1,0323E-3 Wb	1,0323E-3 Wb	1,0323E-3 Wb	440 V

Portanto, na condição de operação em vazio:

$$330V \leq E_C \leq 440V$$

5.5.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO E OBSERVAÇÕES

A montagem feita em laboratório para o ensaio desta topologia, está representada na Figura 41. Os equipamentos utilizados para as medições foram idênticos ao utilizado para os ensaios efetuados com a topologia 1 (transformador isolador).

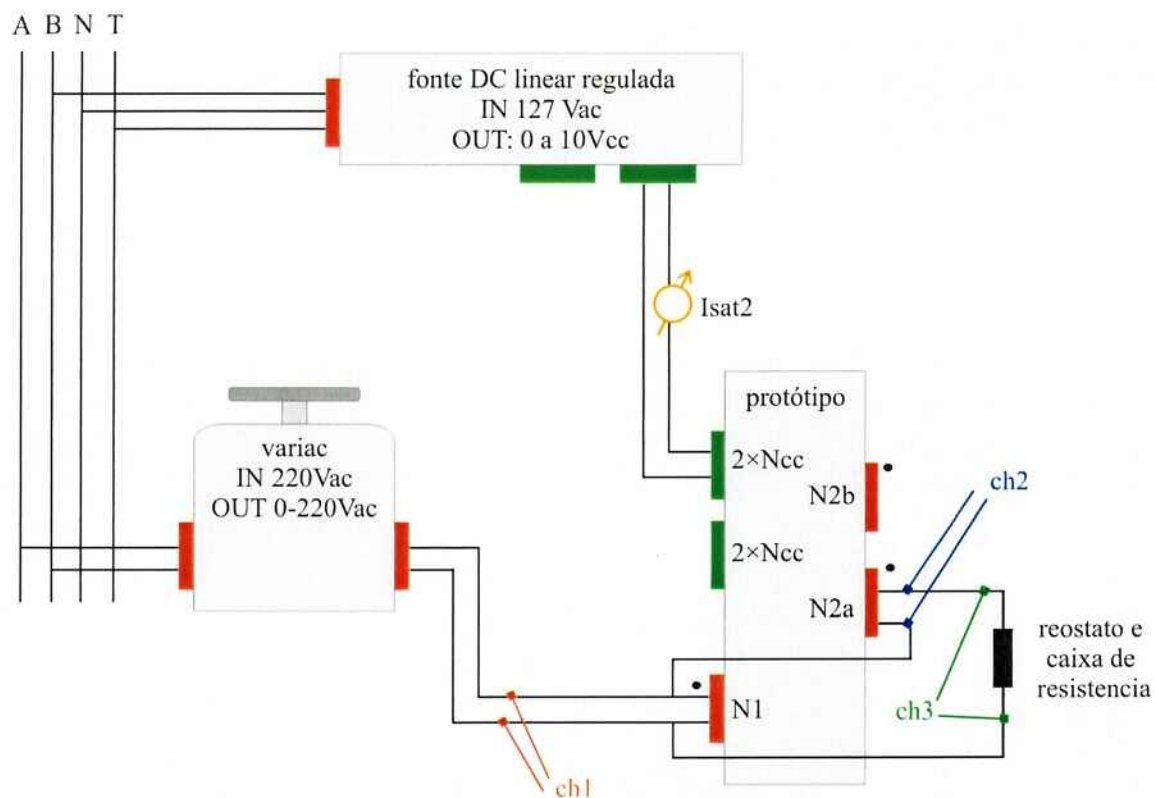


Figura 41 – Topologia 3 – montagem em laboratório

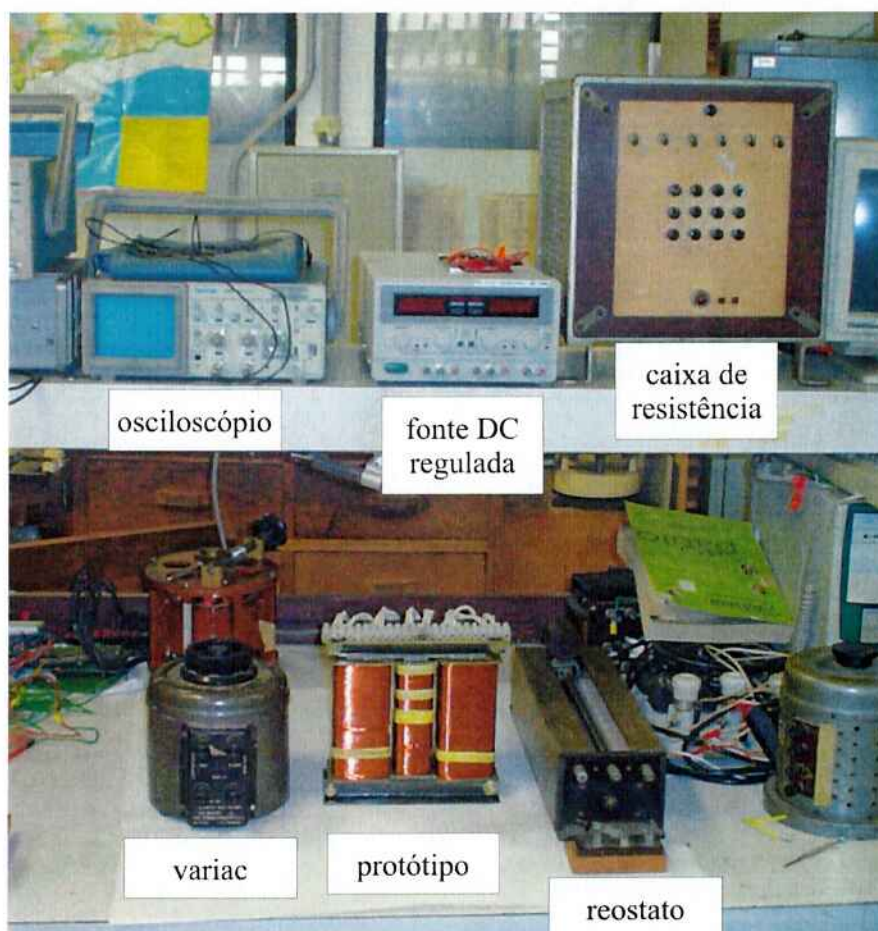


Figura 42 – Foto do bancada do laboratório

Na prática, como a variação de $I_{\text{sat}2}$ é contínua, a variação de E_C também é contínua. Ao mesmo tempo, não se pode dizer que E_C varia sempre linearmente, pois existe a presença do fenômeno de saturação do núcleo ferromagnético que impede esta linearidade.

A Figura 43 corresponde aos dados levantados em laboratório para a condição de operação em vazio. Experimentalmente, o que se observou foi uma grande aproximação dos valores alcançados para a condição em que o equipamento encontrava-se em vazio como exposto na Tabela 8.

Tabela 8 – Topologia 3 – verificação dos resultados

E_C teórico	E_C medido	ΔE_C
330 V	337,9 V	7,9V
440 V	436,2V	3,8V

Quando colocado em carga, diferentemente das outras topologias de ligação elétrica, a topologia 3 apresentou uma regulação aceitável mesmo que, nitidamente observou-se uma grande dependência do valor de E_C em função de $I_{\text{sat}2}$ assim como de I_2 .

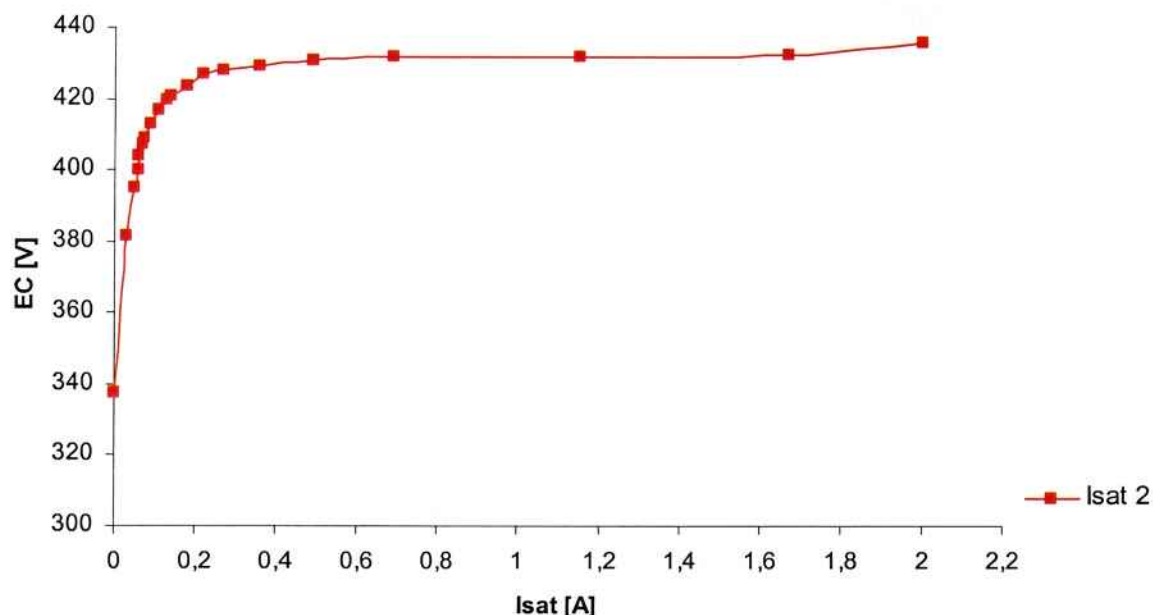


Figura 43 – Topologia 3 – ensaio experimental em vazio

A Figura 44 demonstra o comportamento da tensão E_C para uma variação de I_{sat2} em uma família de curvas em que, cada qual, representa uma carga que consome uma corrente senoidal cujo módulo é constante. Estas curvas também possuem a característica de saturação e revelam que existe um limite de transferência de tensão para o secundário. Nota-se, na mesma Figura 44, que existe uma faixa considerável em que a variação de E_C com a I_{sat2} é linear. O ponto da curva em que E_C começa a saturar depende da corrente consumida pela carga, sendo que, quanto maior for o módulo da tensão I_2 , menor é a faixa em que E_C varia linearmente com I_{sat2} .

Experimentalmente pode-se extrair da Figura 44 uma relação entre a E_C e I_{sat2} para a faixa em que E_C varia linearmente com I_{sat2} , como indicado na Tabela 9.

Destaca-se ainda que a escassez de pontos na parte inferior das curvas da Figura 44 ocorre devido à falta de cargas de baixa resistividade e ao mesmo tempo passíveis de dissiparem uma potência relativamente alta. Nesta região inferior também ocorre uma não linearidade na variação que E_C sofre quando varia-se I_{sat2} . Este fenômeno pode ser observado indiretamente através da Figura 45, onde são feitos ensaios de funcionamento para cargas de impedância constante e com $E_1 = 220$ V. Nesta situação, percebe-se que para a corrente I_{sat2} nula, a tensão E_C não se torna negativa como sugerem as equações mostradas na Tabela 9 quando se extrapola o domínio inferior definido por I_{sat2} mínimo.

Tabela 9 – Topologia 3 – tensão E_C em função da corrente I_{sat2} para várias correntes I_2 resistivas

I_2	E_C	I_{sat2}
0,7A	$E_C[V] = 661,27 \cdot I_{sat2}[A] - 2,42$	$I_{sat2}[A] \in [0,15;0,5]$
0,9A	$E_C[V] = 681,62 \cdot I_{sat2}[A] - 133,33$	$I_{sat2}[A] \in [0,35;0,7]$
1,0A	$E_C[V] = 680,28 \cdot I_{sat2}[A] - 198,42$	$I_{sat2}[A] \in [0,45;0,75]$
1,1A	$E_C[V] = 683,28 \cdot I_{sat2}[A] - 260,87$	$I_{sat2}[A] \in [0,50;0,8]$
1,2A	$E_C[V] = 625,14 \cdot I_{sat2}[A] - 280,37$	$I_{sat2}[A] \in [0,65;0,9]$

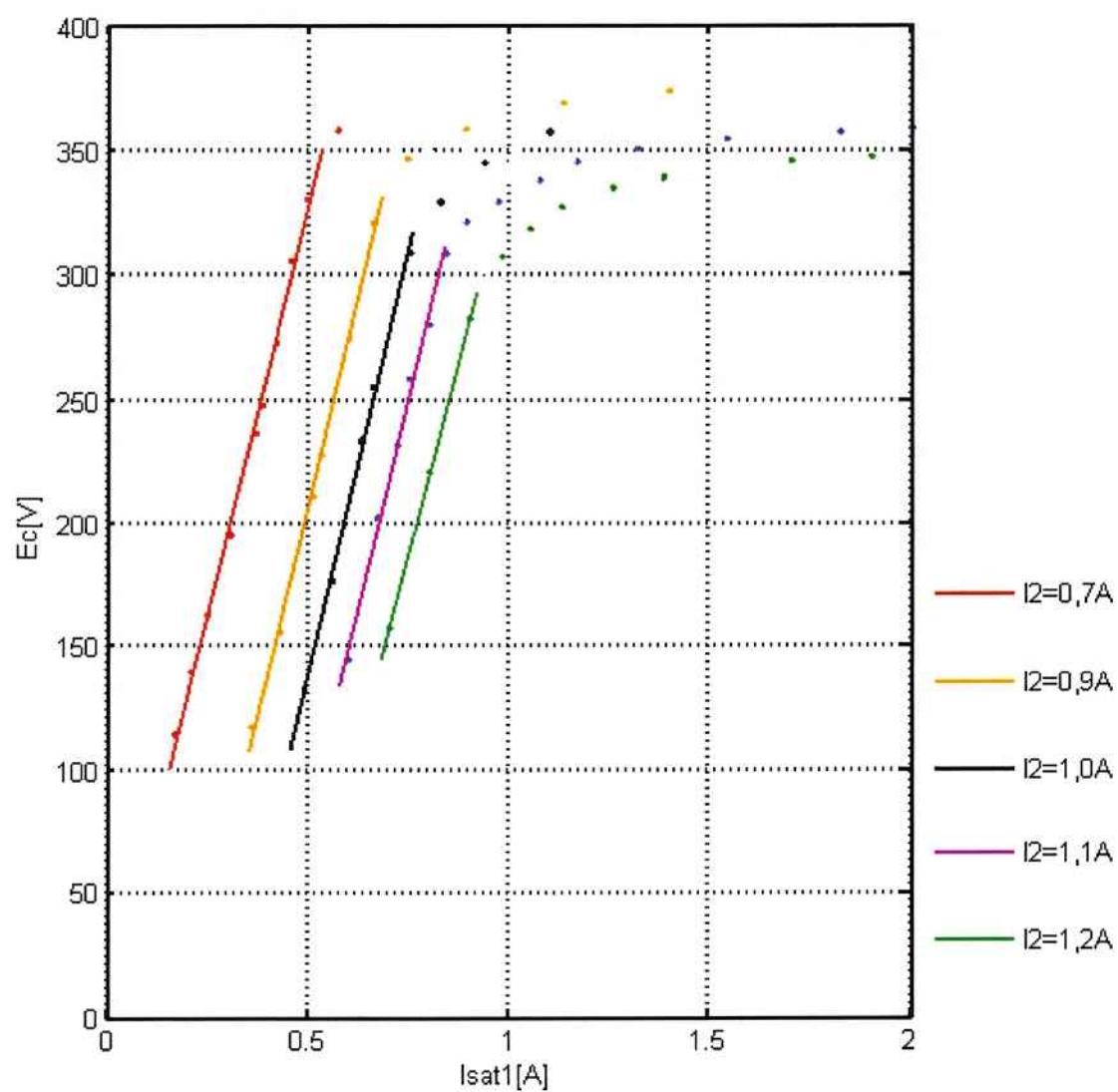


Figura 44 – Topologia 3 – ensaio experimental em carga para cargas resistivas de corrente constante

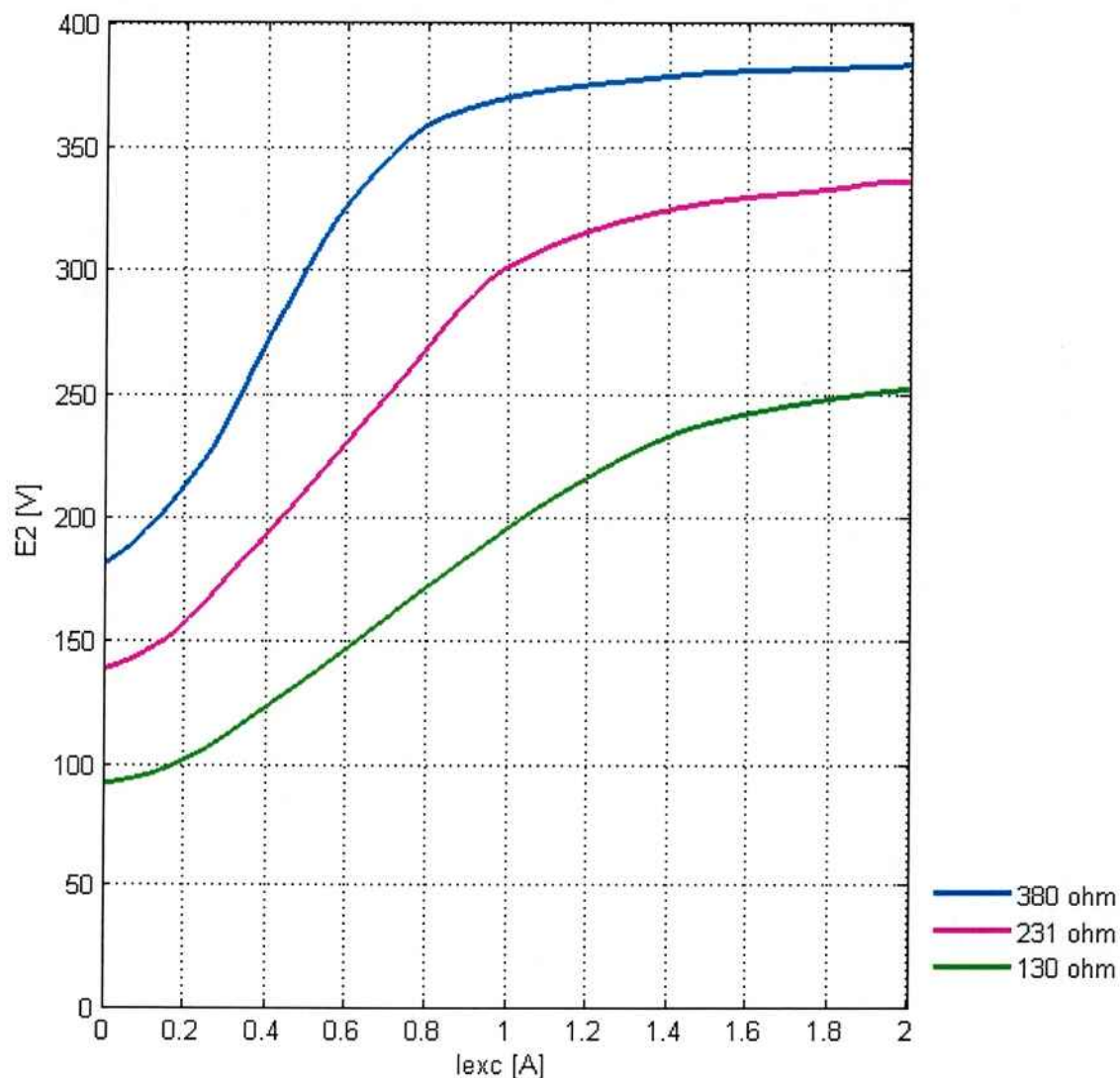


Figura 45 – Topologia 3 – ensaio experimental em carga para cargas resistivas de impedância constante

Uma outra análise interessante é a relação existente entre as potências ativas AC e DC aplicadas ao protótipo para alguns carregamentos. A Figura 26 representa esta relação a partir da seguinte formulação:

$$P_{AC} = E_C \cdot I_2 \text{ (carga resistiva)}$$

$$P_{DC} = R_{CC} \cdot (I_{sat2})^2 = 10,2 \cdot (I_{sat2})^2 \quad (8)$$

Como equacionado na Tabela 9, tem-se:

$$E_C = \alpha \cdot I_{sat2} + \beta \quad (9)$$

Portanto, substituindo as Equações (8) na Equação (9), chega-se que na Equação (10):

$$P_{AC} = I_2 \left(\alpha \sqrt{\frac{P_{DC}}{R_{CC}}} + \beta \right) \quad (10)$$

Por sua vez, substituindo-se na Equação (10) os valores obtidos para cada situação representada na Figura 44 e na Tabela 9, chega-se ao gráfico representado na Figura 26.

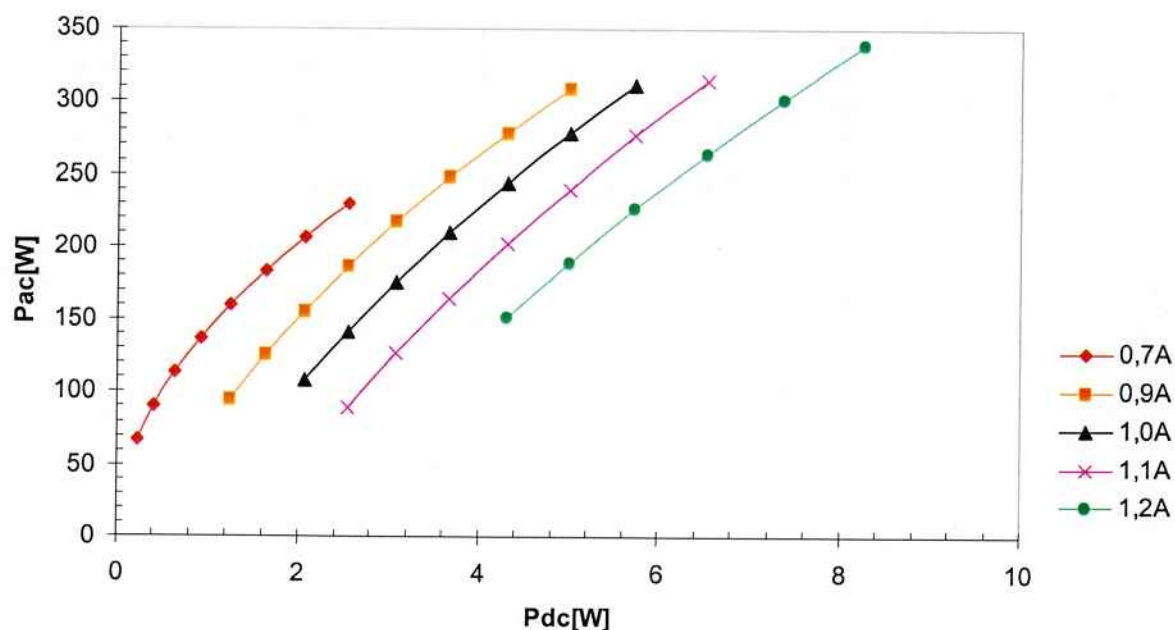


Figura 46 – Topologia 3 – relações entre potências ativas AC e DC para cargas de corrente constante

Para as situações ensaiadas nesta topologia de ligação elétrica 3, a operação em carga do equipamento na região em que E_C varia linearmente com I_{sat2} , encontra-se situações em que, no máximo, P_{DC} equivale a 3% de P_{AC} evidenciando a facilidade com que o fluxo magnético é bloqueado do lado direito do equipamento e condicionado a se fechar pelo braço esquerdo.

6. A BUSCA POR UM CIRCUITO EQUIVALENTE PARA A TOPOLOGIA 3 – AUTOTRANSFORMADOR COM UM ENROLAMENTO SÉRIE

As evidências dos ensaios efetuados com a topologia de ligação 3 fomentaram a busca por um circuito equivalente do protótipo. A modelagem do equipamento através de um circuito elétrico equivalente permitiria prever suas diversas condições de operação, principalmente em

relação a influência que a circulação da corrente $I_{\text{sat}2}$ impõe aos parâmetros resistivos e indutivos do circuito elétrico equivalente.

As tentativas feitas foram a de encaixar os fasores de tensão e corrente, medidos através do osciloscópio no laboratório, em circuitos elétricos equivalentes de dois tipos: os que modelam o circuito através de indutâncias próprias e mútuas (Figura 47); e os que modelam o circuito através de indutância de dispersão e de magnetização (Figura 48) [4].

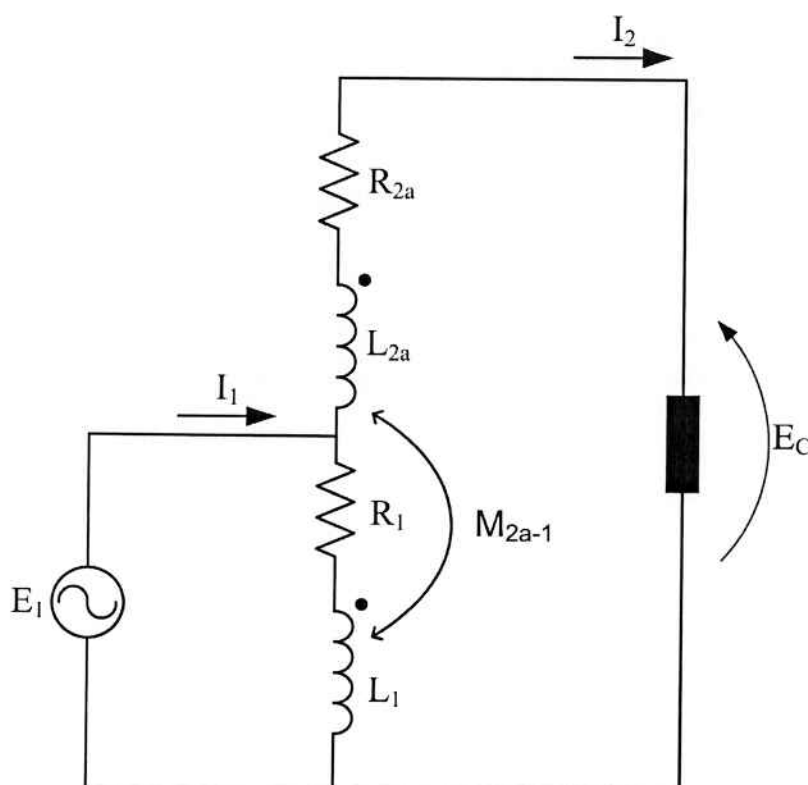


Figura 47 – Topologia 3 – circuito elétrico equivalente – indutâncias próprias e mútuas

Isto posto, uma análise de circuitos elétricos permitiria que, através de ensaios em vazio e em carga, fossem extraídos os valores das resistências e indutâncias que aparecem nos circuitos elétricos equivalentes. Estes ensaios deveriam ser repetidos para cada condição de saturação do braço direito do núcleo ferromagnético, para que assim pudesse ser estudada a variação dos parâmetros do circuito equivalente juntamente com a corrente $I_{\text{sat}2}$.

Porém, este procedimento tomado com ambas as topologias de circuito elétrico equivalente não resultou em valores condizentes. Os fluxos magnéticos de dispersão envolvidos, que circulam também pelo material ferromagnético como mostrado pela Equação (7), dificultam a obtenção de um circuito elétrico equivalente composto por parâmetros resistivos e indutivos que variam com as correntes $I_{\text{sat}2}$ e I_2 .

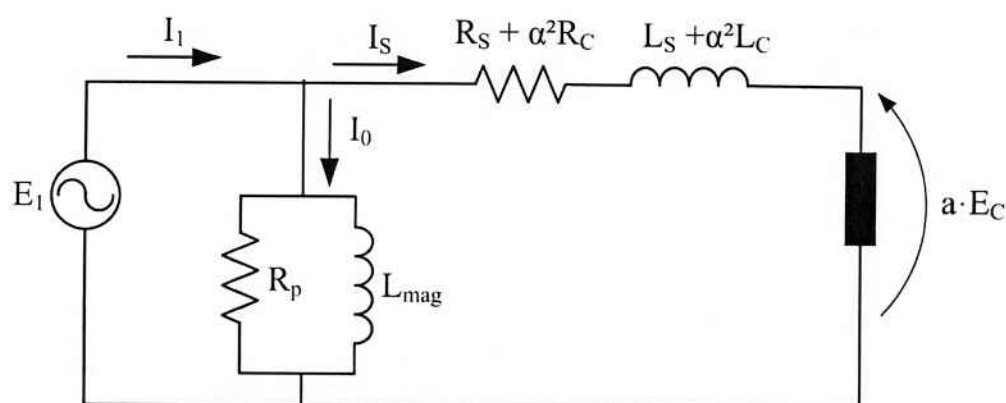


Figura 48 – Topologia 3 – circuito equivalente – indutâncias de dispersão e magnetização

Soma-se a isto o fato de que as medições de tensões induzidas para uma operação em regime, somente contemplam a parcela de fluxo magnético variacional, como garante a lei de Faraday. A parcela de fluxo magnético constante não consegue ser identificada através de uma medição de tensão, impedindo uma análise do circuito magnético que se baseie numericamente na quantidade de fluxo magnético que caminha por cada uma das duas seções dos braços laterais.

7. CONCLUSÕES

Dentre as três topologias estudadas, a operação do protótipo como autotransformador dotado de somente um enrolamento série, mostrou se ser a mais eficaz em termos de regulação. As outras duas topologias (transformador isolador e autotransformador com dois enrolamentos série) perdem aplicação prática dada a altíssima regulação identificada.

Mesmo a topologia 3 (autotransformador com um enrolamento série), pelo fato de possuir uma impedância de dispersão regulável e relativamente alta, seu uso como regulador de tensão em sistemas de distribuição de energia não é uma boa alternativa dada a alta regulação inerente ao seu funcionamento.

Um uso interessante para o equipamento seria como limitador de corrente regulável. Equipamentos como lâmpadas fluorescentes (que possuem reatores) e soldadores a arco elétrico, por exemplo, necessitam de um sistema que limite a corrente e estabilize o funcionamento do circuito elétrico. Assim como a tensão E_c varia com I_{sat2} na ligação do protótipo como autotransformador com um enrolamento série, pode-se afirmar que a indutância de dispersão total entre primário e secundário varia também com I_{sat2} . Deste modo, quanto maior for o valor de I_{sat2} , menor será a indutância de dispersão série,

conseqüentemente maior será o valor da corrente que aparecerá no secundário do transformador. Logicamente, o equipamento regulador de tensão deve ter suas dimensões e números de espiras repensadas dependendo do tipo de aplicação final.

Por fim, a consolidação da modelagem elétrica da topologia de ligação elétrica 3 (autotransformador com um enrolamento série) do equipamento através de softwares de simulações eletromagnéticas que se baseiam no método de elementos finitos é um forte candidato para objeto de estudos futuros. Uma visão detalhada do comportamento magnético do equipamento regulador de tensão, para várias condições de operação, provavelmente possibilitaria a identificação quantitativa de fenômenos magnéticos analisadas qualitativamente neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAY, M. G. **The performance and design of alternating current machine**. 2. ed. Edinburgh: London, 1949.
- [2] Cardoso, J. R. **Circuitos Magnéticos**. PEA2303 – Teoria Eletromagnética – PEA / EPUSP.
- [3] Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. Disponível em < <http://www.equacional.com.br/> >. Acessado em: 02 agosto 2006.
- [4] JORDÃO, R. G. **Transformadores**. SK & C, 1919.
- [5] Massachusetts Institute of Technology - dept. of Electrical Engineering. **Magnetic Circuits and Transformers**. The MIT press, 1943.
- [6] FLANAGAN, W. M. **Handbook of transformer applications**. McGrawHill, 1986
- [7] PERDIZ, F. A. B. **Estudo e desenvolvimento de um novo tipo de regulador de tensão para sistemas de distribuição**. 2001. Projeto de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [8] A. D. Brown; J. N. Ross; K. G. Nichols. **Time-Domain Simulation of Mixed Nonlinear Magnetic and Electronic Systems**. IEEE Transaction on Magnetics. Vol. 37, No 1, January 2001.
- [9] Williams, M. C.; Vogelsong, R. S.; Kundert, K S. **Simulation and Modeling of Nonlinear Magnetics**, Version 1b, August 1994. Disponível em < <http://www.designers-guide.org/Modeling/mag.pdf> >. Acessado em: 03 mai 2006.
- [10] Bittanti, S.; Cuzzola, F. A.; Lorito, F.; Poncia, G. **Compensation of Nonlinearities in a Current Transformer for the Reconstruction of the Primary Current**. IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 9, No 4, July 2001.
- [11] Domnisoru, C. **Using MATHCAD in Teaching Power Engineering**. IEEE Transaction on Education, Vol. 48, No 1, February 2005.
- [12] Chen, Q.; Lee, F. C.; Jiang, J. Z.; Jovanovic, M. M. **A New Model for Multiple-Winding Transformer**. Blacksburg, U.S.A.