



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL DOS ANJOS BENTO DA COSTA

ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DE UM MOTOR-TRANSFORMADOR

CUIABÁ – MT
MAIO, 2023

RAFAEL DOS ANJOS BENTO DA COSTA

ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DE UM MOTOR-TRANSFORMADOR

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Mateus Rondina

CUIABÁ – MT

MAIO, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C837a Costa, Rafael dos Anjos Bento da.
Análise da Funcionalidade de um motor - transformador [recurso eletrônico] / Rafael dos Anjos Bento da Costa. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 25 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: José Mateus Rondina.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.
Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.
Inclui bibliografia.

1. Motor Elétrico, Motor de Indução Trifásico, Transformador Elétrico, Enrolamentos Concêntricos. I. Rondina, José Mateus, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
MATO GROSSO**

DESPACHO

Processo nº 23108.037051/2023-99

Interessado: @interessados_virgula_espaco@

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA MONOGRAFIA: ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DE UM MOTOR-
TRANSFORMADOR**

ALUNO: RAFAEL DOS ANJOS BENTO DA COSTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 30 de maio de 2023.

Nota: 8,77

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Mateus Rondina - Orientador

Prof. Dr. Haroldo Benedito Tadeu Zattar - Examinador

Prof. Dr. Fabrício Parra Santilho - Examinador



Documento assinado eletronicamente por **FABRICIO PARRA SANTILIO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 30/05/2023, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543](#).

[de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **HAROLDO BENEDITO TADEU ZATTAR**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 30/05/2023, às 11:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **JOSE MATEUS RONDINA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 31/05/2023, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5833239** e o código CRC **9F54B425**.

Dedico este trabalho Àquele que, em todos os momentos, foi a minha base para me superar: Deus. Este trabalho não seria possível sem Sua ajuda. Também dedico aos meus pais, que apesar da distância física, sempre estiveram presentes em todos os momentos durante essa longa caminhada.

Gratidão incondicional aos meus pais. Eles sempre acreditaram em mim e, apesar da distância física, sempre estiveram espiritualmente comigo, nos dias mais alegres ou nos dias mais tristes. Sem eles, nada disso aqui seria possível. Ao meu irmão, pela parceria e companheirismo que sempre teve comigo. Aos meus amigos e colegas, em especial a todos que fiz dentro do curso e por meio da Associação Atlética Acadêmica das Engenharias da UFMT, Turuna, por todo suporte, amizade, conquistas, trocas de experiências, esclarecimento de dúvidas e todas as vezes que eu não acreditava que seria possível seguir em frente no caminho. Ao Prof. Dr. José Mateus Rondina pela sua orientação, parceria, dedicação, paciência e profissionalismo. Todo o apoio e atenção dedicados a mim foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho. À coordenadora Prof. Dra. Camila dos Anjos Fantin, que foi como uma figura familiar para mim. Sem o seu grande apoio e incentivo, provavelmente eu não estaria onde me encontro agora. Toda a gratidão do mundo pela senhora. A todos da Manutenção Eletromecânica da Águas Cuiabá, por terem compartilhado comigo experiências e uma nova visão de mundo. A todos os professores e o corpo docente do Departamento que me auxiliaram ao longo dessa caminhada na graduação.

RESUMO

COSTA, R. **Análise da Funcionalidade de um Motor-Transformador**. 2023. 10f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

Passando a maior parte do tempo despercebidos, em pontos distintos do sistema elétrico, seja alterando os níveis de tensão da rede ou dando vida a equipamentos mecânicos por meio da conversão eletromecânica de energia, o transformador elétrico e o motor de indução trifásico são responsáveis pela manutenção das atividades da sociedade moderna, sendo inimaginável a vida sem eles. Apesar de estarem em pontos distintos da cadeia produtiva e realizarem funções completamente distintas, o princípio de funcionamento é estritamente parecido e, nessa perspectiva, o circuito equivalente de ambos é praticamente o mesmo, a não ser por uma pequena diferença: a utilização do lado secundário. Porém não é conhecida a existência de um motor de indução trifásico operando como motor e transformador ao mesmo tempo. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo analisar a funcionalidade de motor de indução consegue operando como motor e como transformador simultaneamente, por meio de enrolamentos concêntricos e, a partir disso, propor um circuito equivalente para essa junção através dos conceitos de circuitos elétricos, formulações matemáticas, ensaios e experimentações em laboratório. No laboratório foram feitos diversos ensaios a fim de mensurar as tensões, correntes e potências nesse equipamento. A partir dessas informações, foram calculados os valores dos parâmetros para ambas as funções e, assim, analisar a tese proposta.

Palavras-chave: Motor Elétrico. Motor de Indução Trifásico. Transformador Elétrico. Enrolamentos Concêntricos.

ABSTRACT

Spending most of the time unnoticed, at different points in the electrical system, whether changing grid voltage levels or bringing mechanical equipment to life through electromechanical energy conversion, the electrical transformer and the three-phase induction motor are responsible for maintenance. of the activities of modern society, life without them being unimaginable. Despite being at different points in the production chain and performing completely different functions, the operating principle is strictly similar and, from this perspective, the equivalent circuit of both is practically the same, except for a small difference: the use of the secondary side. However, the existence of a three-phase induction motor operating as a motor and transformer at the same time is not known. In this sense, this work aimed to analyze the functionality of an induction motor that can operate as a motor and as a transformer simultaneously, through concentric windings and, from this, propose an equivalent circuit for this junction through the concepts of electrical circuits, formulations mathematics, tests, and experiments in the laboratory. In the laboratory, several tests were carried out in order to measure the voltages, currents and powers in this equipment. From this information, parameter values were calculated for both functions and, thus, to analyze the proposed thesis.

Keywords: Electric Motor. Three Phase Induction Motor. Electrical transformer. Concentric Windings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig 1 Ilustração da Lei de Lenz. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 29. | 16 |
| Fig 2 Ilustração de um condutor movendo-se na presença de um campo magnético. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 34. | 16 |
| Fig 3 Fio condutor de corrente na presença de um campo magnético. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 33. | 17 |
| Fig 4 Ilustração de como ocorre a indução de tensão por meio dos fluxos magnéticos. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 79. | 17 |
| Fig 5 Circuito Equivalente de um Transformador. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 88. | 18 |
| Fig 6 Circuito equivalente de um transformador com o secundário referenciado ao primário. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 88. | 18 |
| Fig 7 Circuito equivalente de um transformador com o primário referenciado ao secundário. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 88. | 18 |
| Fig 8 Circuito Equivalente do estator de um motor de indução polifásico. Fonte: FITZGERALD, 2014, pág. 351. | 19 |
| Fig 9 Circuito Equivalente monofásico de um motor de indução polifásico englobando os valores do rotor em relação ao estator. Fonte: FITZGERALD, 2014, pág. 354. | 19 |
| Fig 10 Motor de Indução Trifásico da EBERLE (modificado) utilizado nos experimentos. Fonte: Própria. | 19 |
| Fig 11 Analisador de Energia Fluke 435. Fonte: Fluke, 2023. | 20 |
| Fig 12 Comparativo entre as tensões do primário e secundário e sua Relação de Transformação no Ensaio a Vazio. Fonte Própria. | 22 |
| Fig 13 Comparativo entre as potências e seus Fatores de Potência no Ensaio a Vazio para a função transformador. Fonte: Própria. | 22 |
| Fig 14 Comparativo entre as tensões do primário e secundário e sua Relação de Transformação no Ensaio de Curto-circuito. Fonte: Própria. | 22 |
| Fig 15 Comparativo entre as potências e seus Fatores de Potência no Ensaio de Curto-circuito. Fonte: Própria. | 22 |
| Fig 16 Ensaio a Vazio x Ensaio de Rotor Bloqueado: Comparativo entre Potências. Fonte: Própria. | 23 |
| Fig 17 Circuito equivalente, por fase, da função do transformador. Fonte: Própria. | 23 |
| Fig 18 Circuito equivalente, por fase, da função do motor de indução. Fonte: Própria. | 23 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela I - Características gerais do motor elétrico de indução..... | 19 |
| Tabela II - Dados do motor de indução usado como carga para a função do transformador | 20 |
| Tabela III - Resultado dos parâmetros do circuito equivalente da função do transformador..... | 23 |
| Tabela IV - Resultado dos parâmetros do circuito equivalente da função do motor de indução..... | 23 |
| Tabela V - Perdas nas funções de motor e transformador | 23 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| Pág | Página |
| Fig | Figura |
| v | Velocidade do condutor |
| l | Comprimento do fio |
| B | Densidade de fluxo magnético |
| F | Força resultante |
| N_p | Número de espiras do enrolamento do lado primário do transformador |
| N_s | Número de espiras do enrolamento do lado secundário do transformador |
| a | Relação de transformação, para o referencial teórico |
| P | Potência elétrica |
| R | Resistência |
| X | Reatância |
| n | Velocidade do motor de indução |
| f | Frequência |
| P | Número de polos do motor de indução |
| S | Escorregamento do motor de indução |
| V | Volts, unidade de tensão elétrica |
| I | Corrente elétrica |
| A | Ampères, unidade de medida de corrente elétrica |
| cv | Cavalo-vapor, unidade de potência mecânica |
| RPM | Rotações por minuto, unidade de velocidade |
| FP | Fator de potência |
| kW | Kilo-Watt, unidade de medida de potência ativa |
| kVAr | Kilo Volt-Ampère reativo, unidade de medida de potência reativa |
| kVA | Kilo Volt-ampère, unidade de medida de potência aparente |
| Hz | Hertz, unidade de medida de frequência |
| n | Relação de transformação, para o desenvolvimento dos cálculos |

| | |
|-------------|--|
| R_1 | Resistência dos enrolamentos da máquina, englobando as funções transformador e motor |
| R_C | Resistência de perdas no cobre do estator da máquina |
| X_M | Reatância de dispersão do estator |
| R_2 | Resistência de perdas no rotor |
| R_2' | Resistência de perdas no rotor referenciado ao primário |
| X_2 | Reatância de dispersão do rotor |
| X_2' | Reatância de dispersão do rotor referenciado ao primário |
| Z_{rb1} | Impedância de rotor bloqueado |
| E_1 | Tensão induzida no rotor |
| P_{RC} | Potência de perda no cobre do estator da máquina |
| $V_{1\phi}$ | Tensão de fase monofásica |
| $P_{1\phi}$ | Potência ativa monofásica |
| $Q_{1\phi}$ | Potência reativa monofásica |
| P_{R1} | Potência de perdas no estator |
| I_1 | Corrente do primário/estator |
| I_2 | Corrente do secundário/rotor |
| I_M | Corrente de magnetização |
| I_C | Corrente parasita |

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------|----|
| I. INTRODUÇÃO | 15 |
| II. REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| III. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 19 |
| IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 21 |
| V. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 24 |
| VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 24 |

ANÁLISE DA FUNCIONALIDADE DE UM MOTOR-TRANSFORMADOR

Rafael dos Anjos Bento da Costa

Universidade Federal de Mato Grosso. Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá-MT

Resumo - Passando a maior parte do tempo despercebidos, em pontos distintos do sistema elétrico, seja alterando os níveis de tensão da rede ou dando vida a equipamentos mecânicos por meio da conversão eletromecânica de energia, o transformador elétrico e o motor de indução trifásico são responsáveis pela manutenção das atividades da sociedade moderna, sendo inimaginável a vida sem eles. Apesar de estarem em pontos distintos da cadeia produtiva e realizarem funções completamente distintas, o princípio de funcionamento é estritamente parecido e, nessa perspectiva, o circuito equivalente de ambos é praticamente o mesmo, a não ser por uma pequena diferença: a utilização do lado secundário. Porém não é conhecida a existência de um motor de indução trifásico operando como motor e transformador ao mesmo tempo. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo analisar a funcionalidade de motor de indução consegue operando como motor e como transformador simultaneamente, por meio de enrolamentos concêntricos e, a partir disso, propor um circuito equivalente para essa junção através dos conceitos de circuitos elétricos, formulações matemáticas, ensaios e experimentações em laboratório. No laboratório foram feitos diversos ensaios afim de mensurar as tensões, correntes e potências nesse equipamento. A partir dessas informações, foram calculados os valores dos parâmetros para ambas as funções e, assim, analisar a tese proposta.

Palavras-Chave – Enrolamentos Concêntricos. Motor Elétrico. Motor de Indução Trifásico. Transformador Elétrico.

ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF A MOTOR-TRANSFORMER

Abstract - Spending most of the time unnoticed, at different points in the electrical system, whether changing grid voltage levels or bringing mechanical equipment to life through electromechanical energy conversion, the electrical transformer and the three-phase induction motor are responsible for maintenance of the activities of modern society, life without them being unimaginable. Despite being at different points in the production chain and performing completely different functions, the operating principle is strictly similar and, from this perspective, the equivalent circuit of both is practically the same, except for a small difference: the use of the secondary side. However, the existence of a three-phase induction motor operating as a motor and transformer at the same time is not known. In this sense, this work aimed

to analyze the functionality of an induction motor that can operate as a motor and as a transformer simultaneously, through concentric windings and, from this, propose an equivalent circuit for this junction through the concepts of electrical circuits, formulations mathematics, tests, and experiments in the laboratory. In the laboratory, several tests were carried out in order to measure the voltages, currents and powers in this equipment. From this information, parameter values were calculated for both functions and, thus, to analyze the proposed thesis.

Keywords - Concentric Windings. Electric Motor. Electrical transformer. Three Phase Induction Motor.

I. INTRODUÇÃO

O transformador elétrico de potência é um equipamento que tem por finalidade alterar o nível de tensão de um ponto para outro do sistema elétrico por meio de indução eletromagnética.

O motor elétrico de indução trifásico é um equipamento composto por uma parte fixa (o estator) e uma parte móvel (o rotor), onde o estator recebe tensão alternada e produz um campo eletromagnético girante, induzindo uma tensão nos enrolamentos do rotor que responde criando um outro campo girante em resposta com frequência e velocidade diferente do estator. Por meio disso, com o campo girante do rotor tentando encontrar o do estator, observa-se o movimento de rotação do rotor, que nada mais é que a conversão de energia elétrica em mecânica.

Apesar de exercerem funções completamente diferentes no sistema elétrico, possuem a mesma lógica de funcionamento e, coincidentemente, o mesmo circuito equivalente. Sendo assim, torna-se interessante descobrir se um motor de indução trifásico consegue operar como motor e como transformador simultaneamente, por meio de enrolamentos concêntricos, e se existe um circuito equivalente caso haja uma resposta positiva para o primeiro questionamento levantado.

A justificativa desse trabalho de pesquisa tem norte na existência quase nula de estudos nesse tema, a verificação da existência desse equipamento especial e seu possível circuito equivalente pode nortear estudos cada vez mais aprofundados e alcançar o desenvolvimento e aprimoramento de um equipamento que possa revolucionar – ou não – o mercado elétrico de equipamentos.

O objetivo geral foi verificar a existência de um motor de indução trifásico que simultaneamente é um transformador por meio de enrolamentos concêntricos e, para uma resposta positiva, seu circuito equivalente por meio de experimentações no laboratório de Máquinas Elétricas do

Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Cuiabá-MT.

Como objetivos específicos pode-se listar: avaliar o motor de indução por meio de ensaios a vazio e de rotor bloqueado para determinação de parâmetros; avaliar o transformador por meio de ensaios a vazio e curto-circuito para determinação de parâmetros; realizar o funcionamento do motor e, simultaneamente, da parte que diz respeito ao transformador por meio de enrolamentos concêntricos e realizar medições de parâmetros a fim de realizar comparações; verificar a possibilidade de elaboração de um circuito equivalente para esse equipamento especial; discutir como que esses parâmetros levantados corroboram para a existência desse equipamento e, conseqüentemente, seu circuito equivalente.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

1) **LEI DE FARADAY:** - A lei de Faraday afirma que, se houver um fluxo passando através de uma espira de fio condutor, então uma tensão será induzida sendo diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo em relação ao tempo. Na forma de equação, temos:

$$e_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

em que e_{ind} é a tensão induzida em uma espira da bobina e ϕ é o fluxo que passa através da espira (CHAPMAN, 2013, pág. 28).

Se uma bobina tiver N espiras e se o mesmo fluxo cruzar todas elas, então a tensão induzida na bobina inteira será dada por

$$e_{ind} = -N\frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

O sinal negativo nas equações é uma expressão da lei de Lenz, na qual afirma que o sentido com que a tensão cresce na bobina é tal que, se os terminais da bobina fossem colocados em curto-circuito, então seria produzida uma corrente que causaria um fluxo oposto à variação original de fluxo. Nessa perspectiva, como a tensão induzida opõe-se à variação que a está produzindo, então inclui-se um sinal negativo na equação, que é ilustrado na figura 1. (CHAPMAN, 2013, pág. 29).

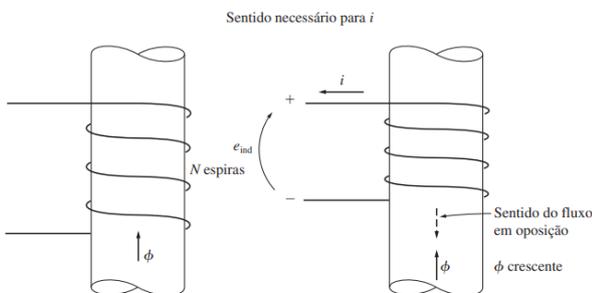


Fig 1 Ilustração da Lei de Lenz. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 29.

Existe uma segunda forma importante de interação de um campo magnético com o seu redor. Se um condutor estiver orientado adequadamente e se deslocando dentro de um campo magnético, então uma tensão será induzida nele (CHAPMAN, 2013, pág. 34).

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (3)$$

Na qual

\vec{v} = velocidade do condutor;

\vec{B} = vetor densidade de fluxo magnético;

\vec{l} = comprimento do condutor dentro do campo magnético.

O vetor \vec{l} tem a mesma direção do condutor e aponta para a extremidade que faz o menor ângulo com o vetor $\vec{v} \times \vec{B}$. A tensão no condutor é produzida de modo que o polo positivo aponta no mesmo sentido do vetor $\vec{v} \times \vec{B}$, apresentado na figura 2. (CHAPMAN, 2013, pág. 34)

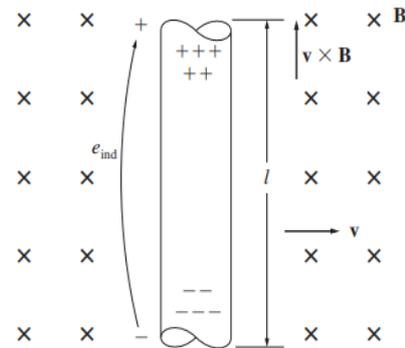


Fig 2 Ilustração de um condutor movendo-se na presença de um campo magnético. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 34.

Há um terceiro efeito de um campo magnético em sua vizinhança. O campo magnético pode induzir uma força em um fio que esteja conduzindo uma corrente dentro do campo (CHAPMAN, 2013, pág. 33).

A figura 3 sintetiza esse conceito mostrando um condutor que está presente no interior de um campo magnético uniforme de densidade de fluxo B , que aponta para dentro da página. O condutor tem l metros de comprimento e conduz uma corrente de i ampères. A força induzida no condutor é dada por:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (4)$$

em que,

i = valor da corrente no fio condutor;

\vec{l} = comprimento do fio, com o sentido de l definido como igual ao sentido do fluxo de corrente;

\vec{B} = vetor densidade de fluxo magnético (CHAPMAN, 2013, pág. 33).

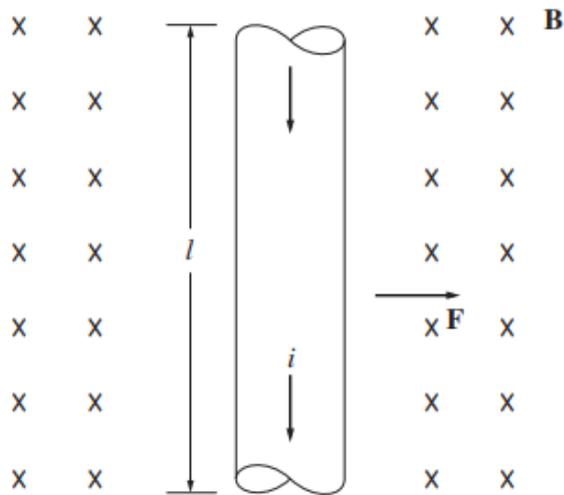


Fig 3 Fio condutor de corrente na presença de um campo magnético. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 33.

O sentido da força é dado pela regra da mão direita: se o dedo indicador da mão direita apontar no sentido do vetor l e o dedo médio apontar no sentido do vetor B de densidade de fluxo, então o polegar apontará no sentido da força resultante sobre o fio. O valor da força é dado pela equação

$$F = ilB \sin \theta \quad (5)$$

em que θ é o ângulo entre o fio condutor e o vetor densidade de fluxo (CHAPMAN, 2013, pág. 33).

2) *Transformador de Potência* - Um transformador de potência é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Ele consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum. Essas bobinas (usualmente) não estão conectadas diretamente entre si. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo (CHAPMAN, 2013, pág. 67).

Um transformador ideal é um dispositivo sem perdas com um enrolamento de entrada e um enrolamento de saída. As relações entre a tensão de entrada e a tensão de saída e entre a corrente de entrada e a corrente de saída são dadas por duas equações simples, explicitadas pela figura 4. (CHAPMAN, 2013, pág. 69).

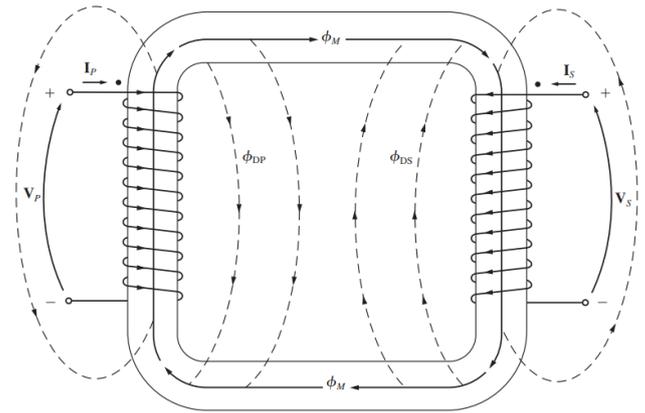


Fig 4 Ilustração de como ocorre a indução de tensão por meio dos fluxos magnéticos. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 79.

O transformador tem N_P espiras de fio no lado do enrolamento primário e N_S espiras de fio no lado do secundário. A relação entre a tensão $v_P(t)$ aplicada no lado do enrolamento primário do transformador e a tensão $v_S(t)$ produzida no lado do secundário é:

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (6)$$

Na qual a variável a é definido como a relação de espiras ou relação de transformação do transformador (CHAPMAN, 2013, pág. 69).

A relação entre a corrente $i_P(t)$ que entra no lado primário do transformador e a corrente $i_S(t)$ que sai do lado secundário do transformador é:

$$N_P * i_P(t) = N_S * i_S(t) \quad (7)$$

Rearranjando em termos da relação de transformação:

$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = \frac{1}{a} \quad (8)$$

(CHAPMAN, 2013, pág. 69).

A potência ativa de entrada P_{entrada} fornecida ao transformador pelo circuito primário é dada pela equação:

$$P_{\text{entrada}} = V_P * i_P * \cos \theta_P \quad (9)$$

em que θ_P é o ângulo entre a tensão primária e a corrente primária. A potência ativa $P_{\text{saída}}$ fornecida pelo circuito secundário do transformador à sua carga é dada pela equação

$$P_{saída} = V_s * i_s * \cos \theta_s \quad (10)$$

em que θ_s é o ângulo entre a tensão secundária e a corrente secundária. Como em um transformador ideal os ângulos entre tensão e corrente não são afetados, então temos $\theta_P = \theta_s = \theta$. Os enrolamentos primário e secundário de um transformador ideal têm o mesmo fator de potência (CHAPMAN, 2013, pág. 71).

Aplicando as equações que envolvem a relação de espiras, obtemos $V_S = V_P/a$ e $I_S = aI_P$, de modo que:

$$P_{saída} = \frac{V_P}{a} (a * i_P) \cos \theta \quad (11)$$

$$P_{saída} = V_P * i_P * \cos \theta = P_{entrada} \quad (12)$$

Portanto, a potência de saída de um transformador ideal é igual à sua potência de entrada. E a mesma relação aplica-se à potência reativa e à potência aparente (CHAPMAN, 2013, pág. 71).

No circuito apresentado pela figura 5, R_P é a resistência do enrolamento primário, $X_P (= \omega L_P)$ é a reatância devido à indutância de dispersão do primário, R_S é a resistência do enrolamento secundário e $X_S (= \omega L_S)$ é a reatância devido à indutância de dispersão do secundário.

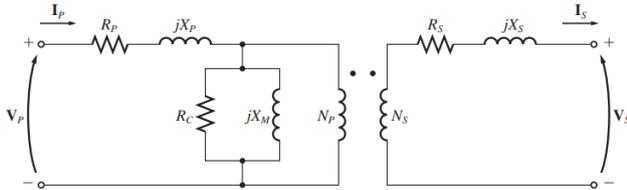


Fig 5 Circuito Equivalente de um Transformador. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 88.

O ramo de excitação é modelado pela resistência R_C (histerese e perdas no núcleo) em paralelo com a reatância X_M (corrente de magnetização) (CHAPMAN, 2013, pág.88).

A seguir apresenta-se os modelos dos circuitos equivalentes referidos ao nível de tensão do primário e a nível do secundário, respectivamente ilustrados pelas figuras 6 e 7.

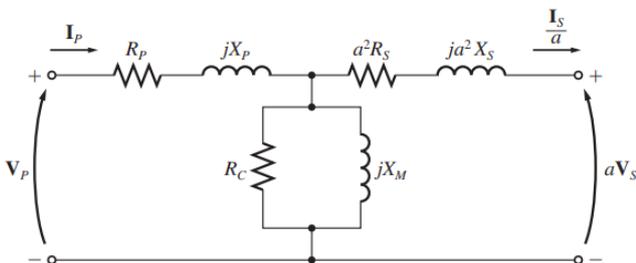


Fig 6 Circuito equivalente de um transformador com o secundário referenciado ao primário. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 88.

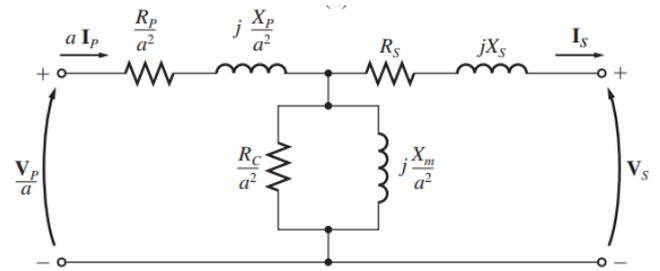


Fig 7 Circuito equivalente de um transformador com o primário referenciado ao secundário. Fonte: CHAPMAN, 2013, pág. 88.

3) *Motor Elétrico de Indução*: O motor de indução é uma máquina em que a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, ao passo que o rotor recebe a corrente por indução, como em um transformador, a partir do estator (FITZGERALD, 2014, pág. 344).

Essas máquinas são denominadas máquinas de indução porque a tensão do rotor (que produz a corrente do rotor e o campo magnético do rotor) é induzida nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios. A característica que diferencia um motor de indução dos demais é que não há necessidade de uma corrente de campo CC para fazer a máquina funcionar (CHAPMAN, 2013, pág. 307).

Quando a excitação é feita por uma fonte polifásica equilibrada, um campo magnético é produzido no entreferro girando na velocidade síncrona. Essa velocidade é determinada pelo número de polos do estator e pela frequência f aplicada ao estator (FITZGERALD, 2014, pág. 344).

$$n(RPM) = \frac{120 * f}{P} \quad (13)$$

O rotor de uma máquina de indução polifásica pode ser de dois tipos. O rotor bobinado é construído na forma de um enrolamento polifásico semelhante ao estator tendo o mesmo número de polos. Os terminais do enrolamento do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados montados sobre o eixo. Escovas de carvão apoiadas sobre esses anéis permitem que os terminais do rotor se tornem disponíveis externamente ao motor (FITZGERALD, 2014, pág. 344).

Já o rotor de gaiola de esquilo consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores (FITZGERALD, 2014, pág. 344).

Seja n_s rpm a velocidade síncrona do campo de estator. A diferença entre a velocidade síncrona e a do rotor é normalmente referida como o escorregamento do rotor. Neste caso, o escorregamento do rotor é $(n_s - n)$, medido em rotações por minuto (rpm) (FITZGERALD, 2014, pág. 344). O escorregamento é expresso em geral como uma fração da velocidade síncrona como:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (14)$$

(FITZGERALD, 2014, pág. 346).

Para o circuito equivalente, deduzindo para uma fase fica subentendido que as tensões e correntes nas demais fases podem ser obtidas por meio de um simples deslocamento adequado da fase ($\pm 120^\circ$ no caso de uma máquina trifásica) (FITZGERALD, 2014, pág. 344).

O circuito equivalente de um motor de indução, que representa os fenômenos ocorridos no estator, é exatamente igual ao usado para representar o primário de um transformador. Para completar o circuito equivalente, os efeitos do rotor devem ser incluídos, como é mostrado abaixo pela figura 8. (FITZGERALD, 2014, pág. 351).

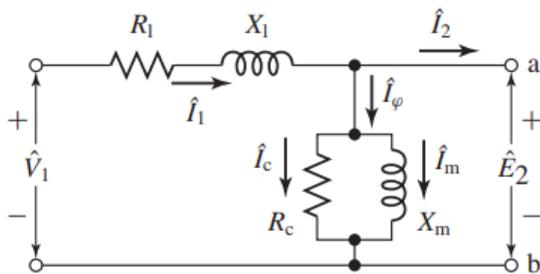


Fig 8 Circuito Equivalente do estator de um motor de indução polifásico. Fonte: FITZGERALD, 2014, pág. 351.

Deve-se incluir os efeitos do rotor por um simples motivo: o circuito equivalente proposto anteriormente engloba os efeitos do estator, que atua na frequência da rede. O rotor recebe uma tensão induzida e, por isso, atua em outra frequência, surgindo assim a necessidade de determinar parâmetros do rotor em relação ao estator, mostrado pela figura 9. (FITZGERALD, 2014, pág. 351).

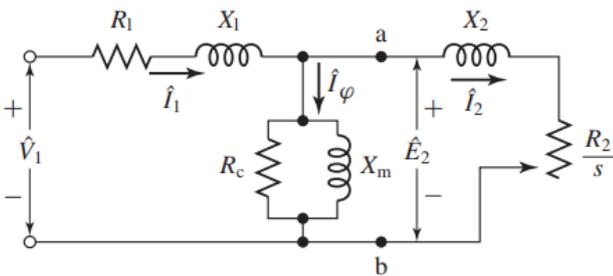


Fig 9 Circuito Equivalente monofásico de um motor de indução polifásico englobando os valores do rotor em relação ao estator. Fonte: FITZGERALD, 2014, pág. 354.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A finalidade desse trabalho de pesquisa foi baseada na pesquisa aplicada, na qual por meio de conhecimentos empíricos prévios, tentou-se analisar a operacionalidade de um motor-transformador.

O objetivo dessa pesquisa foi de cunho descritiva e exploratória, onde foi necessário buscar conhecimentos já previamente desenvolvidos em materiais bibliográficos para que se pudesse, em laboratório, colher dados específicos da realidade em experimentos.

Para a análise de operação do motor-transformador foi definido o método científico de pesquisa hipotético-dedutivo, conforme Popper (1975) conceitua em sua literatura, por meio de uma abordagem quali-quantitativa, onde existirão partes que os dados serão analisados de forma valorativa e outra parte que serão analisados por meio de expressões matemáticas.

Os experimentos foram realizados no laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica, na Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Campus Cuiabá.

O equipamento principal utilizado foi um motor de indução trifásico na qual o estator teve sua configuração alterada de um enrolamento por fase para dois por fase, dispostos em paralelo, para que um trio de enrolamentos fosse responsável pelo funcionamento do motor e o outro trio, pelo funcionamento do transformador

A tensão de alimentação para esse experimento foi em 220 V fase-fase, que corresponde a tensão nominal dos enrolamentos, e o método de acionamento do motor foi o de partida em rampa por meio de um variador de tensão.

Para as medições foi utilizado dois multímetros, um wattímetro e um analisador de energia.

O motor manuseado foi o de indução trifásico, rotor gaiola de esquilo, da marca EBERLE (modificado) e pode ser visto na Figura 10. Suas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela I - Características gerais do motor elétrico de indução

| Motor de Indução Trifásico | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Fabricante | EBERLE (modificado) |
| Modelo | S 112 M4 |
| Potência (cv) | 7,5 |
| Tensão (V) | 220/380 |
| Corrente (A) | 21,0 / 12,0 |
| Velocidade (RPM) | 1735 |
| Fator de Potência (à plena carga) | 0,81 |



Fig 10 Motor de Indução Trifásico da EBERLE (modificado) utilizado nos experimentos. Fonte: Própria.

O instrumento que foi o principal responsável pelas medições foi o Analisador de Energia Fluke 435, ligado entre o motor e a fonte de tensão, na qual mediu-se tensão de linha, corrente de fase, potência ativa, reativa, aparente e o fator de potência para os ensaios a vazio e curto-circuito para a parte do transformador e ensaio a vazio e de rotor bloqueado para a parte do motor.



Fig 11 Analisador de Energia Fluke 435. Fonte: Fluke, 2023.

Tendo por objetivo a mensuração dos parâmetros que compõem o circuito equivalente, o experimento se dividiu em ensaios para a função de transformador e motor.

Tendo como partida a parte das bobinas que compõe o lado do transformador, realizou-se dois ensaios: a vazio e de curto-circuito.

O ensaio a vazio teve por finalidade a determinação dos parâmetros do ramo de magnetização do circuito, que é localizado no estator. Por meio de um variador de tensão conectado a uma fonte trifásica de 220 V, alimentou-se a bobina 4/1, com uma tensão que corresponde a máxima corrente que a bobina suportaria (32V, 7.5A). Assim, observou-se os resultados na bobina 1/4 (primário) e aplicou-se outros dois níveis de tensão, um maior (50V) e outro menor (20V) e, por meio do analisador de energia, mediu-se tensão (V), corrente (A), potência ativa (kW), reativa (kVAr), aparente (kVA) e, também, o fator de potência para os três casos. Cabe ressaltar que o ensaio foi feito em uma das fases por uma questão de simplificação uma vez que o que acontece em uma das fases, acontece para as demais.

O ensaio de curto-circuito teve por objetivo a determinação dos parâmetros do ramo série do primário (estator), que também será o mesmo para ambas as funções.

Seguindo praticamente os mesmos passos do ensaio a vazio, a única diferença entre os ensaios é que nesse faz-se um curto-circuito na bobina 4/1 que antes estava aberta. Então, com o auxílio de um variador de tensão energizado por uma fonte trifásica, energizou a bobina 4/1 que está sob um curto-circuito e aplicou-se três correntes diferentes e observou-se os resultados na bobina 1/4 por meio de um voltímetro em seus terminais, por um amperímetro na saída do variador de tensão e na entrada da bobina 4/1 para mensuração do módulo da corrente e por um analisador de energia que estava medindo tensão de fase (V), corrente de linha (A), potência ativa (kW), reativa (kVAr), aparente (kVA) e fator de potência (FP) da bobina em questão.

Feito isso, deu-se início aos ensaios para determinação dos parâmetros do motor de indução trifásico. O primeiro ensaio feito foi o ensaio a vazio, que assim como foi feito na função

do transformador, serve para determinar o ramo de magnetização do estator. Agora, como trata-se de um motor, para esse ensaio aplicou-se tensão e frequência nominal nas bobinas (220V-60Hz), sendo que a tensão foi variada de zero até a tensão almejada, com o auxílio de um amperímetro conectado entre o variador de tensão e o motor e um voltímetro medindo a tensão do estator, que teve seus enrolamentos conectados em triângulo. Com isso, com o analisador de energia conectado nas três fases, conseguiu-se medir tensão de linha (V), corrente de linha (A), potência ativa (kW), reativa (kVAr), aparente (kVA) e o fator de potência (FP).

Em seguida, foi realizado o ensaio de rotor bloqueado na qual teve por objetivo a determinação das impedâncias de dispersão. Esse ensaio consistiu em colocar o motor de indução para funcionar (girar) de modo que seu rotor fosse bloqueado, ou seja, impedido de girar. Para isso, por meio de uma fonte trifásica de 220V ligada a um variador de tensão, aplicou-se tensão nominal no motor que estava conectado em triângulo, que foi aferida por meio de um amperímetro na entrada do motor e um voltímetro medindo a tensão aplicada ao estator para uma maior confiabilidade no processo. Assim, com o analisador de energia conectado a cada uma das três fases alimentando o motor, conseguiu-se medir tensão de linha do estator (V), corrente de linha (A), potência ativa (kW), reativa (kVAr), aparente (kVA) e o fator de potência (FP).

Logo após a este ensaio, foi realizado um teste na qual teve por objetivo colocar o motor em funcionamento e acoplar uma carga no secundário do lado do transformador para averiguar como este equipamento iria se comportar. Seguiu-se os mesmos passos do ensaio a vazio para colocar o motor em funcionamento: a ligação feita em seus terminais foi a em delta, aplicando 220 V com um amperímetro conectado entre a fonte e o motor e um voltímetro entre as fases, a fim de monitorar e controlar os parâmetros por meio da alteração do módulo por meio do variador de tensão. Para o lado do transformador, foi escolhido um motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo como carga, com os seguintes dados:

Tabela II - Dados do motor de indução usado como carga para a função do transformador

| Motor de Indução Trifásico | |
|----------------------------|-------------|
| Fabricante | WEG |
| Modelo | W22 PREMIUM |
| Potência (cv) | 1 |
| Tensão (V) | 220/380 |
| Corrente (A) | 2,89/1,67 |
| Velocidade (RPM) | 1715 |
| Fator de Potência | 0,82 |

Atuando como carga, esse motor foi ligado em delta, para que se pudesse aplicar 220 V em seus terminais.

O último ensaio realizado foi o ensaio com tensão contínua para as bobinas da função transformador e motor, visando determinar suas resistências se utilizando da relação $R = V/I$ (Lei de Ohm). Para tal, utilizou-se uma fonte trifásica alternada de 220V, que foi controlada por um variador de tensão e retificada por uma ponte retificadora trifásica de onda completa que foi o responsável pela linearização do sinal da fonte. Também foi utilizado um amperímetro entre as bobinas

e a ponte retificadora e um voltímetro na bobina, para que se pudesse fazer as medições. O processo se deu logo após o ensaio de rotor bloqueado, aproveitando a temperatura de utilização das bobinas para uma maior confiabilidade dos valores. Assim, aplicou-se cinco valores diferentes de tensão, variando de 1 a 5 volts, em cada uma das seis bobinas, englobando as bobinas da função do motor e da função do transformador, e para cada valor de tensão anotou-se seus respectivos valores de corrente.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a obtenção dos parâmetros para os circuitos equivalentes foram feitos ensaios para as funções de transformador e motor. Para a determinação dos parâmetros da função do transformador foram feitos os ensaios a vazio e de curto-circuito, seguindo os mesmos procedimentos descritos na literatura para um transformador de potência, só que com a limitação do primário ser o estator e o secundário ser o rotor. Inicialmente, determinou-se o valor da resistência dos enrolamentos da função de transformador e motor. Para isso, utilizou-se:

$$R1 = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (15)$$

O ensaio a vazio foi realizado com o objetivo de calcular os parâmetros do ramo de magnetização dos enrolamentos do transformador.

Partindo de que a impedância de magnetização é muito maior que a impedância do estator, despreza-se esta última pois a queda de tensão em cima dela é muito pequena. Nessa perspectiva, pode-se desprezar a impedância do rotor pois a corrente que circula nele é zero.

Para os ensaios com a função transformador, realizou-se três testes, sendo o primeiro com a máxima corrente que a bobina dessa função suportaria, a segunda com uma corrente intermediária e o terceiro com uma corrente com um módulo menor. Nessa perspectiva, inferindo-se que a tensão em cima do resistor que modela as perdas no cobre para essa função é a tensão de fase-neutro, consegue-se obter:

$$R_c = \frac{V_{1\phi}^2}{P_{1\phi}^2} \quad (16)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, a tensão encima da reatância que modela as perdas pela rotação dos domínios magnéticos sendo a tensão de fase-neutro, seu valor pode ser determinado por:

$$X_m = \frac{V_{1\phi}^2}{Q_{1\phi}^2} \quad (17)$$

O ensaio de curto-circuito visa mensurar os parâmetros do ramo série da função do transformador. Como a impedância de magnetização é muito maior que a impedância do estator, conseqüentemente a corrente que passa pelo ramo paralelo é muito pequena, podendo desconsiderá-lo nesse ensaio. Como

a fonte irá “ver” o circuito equivalente das impedâncias em série, refletiu-se a impedância do secundário para o primário, de forma a obter

$$R2 = \frac{R2'}{n^2} \quad (18)$$

$$X2 = \frac{X2'}{n^2} \quad (19)$$

Sendo n a média das relações de transformação dos três ensaios.

Para a função de motor, diferentemente do transformador, o cálculo dos parâmetros é bem mais complexo e requer muita atenção uma vez que o rotor trabalha numa frequência diferente do estator.

Seguindo nessa linha, o ensaio de rotor bloqueado procura-se mensurar os parâmetros do ramo de série do estator.

Como o rotor está bloqueado, o escorregamento é máximo e equivale a um. O rotor, por não estar na frequência da rede, não irá representar a realidade e, por isso, não entrará nesses cálculos.

Como a tensão aplicada ao estator é pequena e a corrente induzida no rotor é alta, a corrente do ramo magnetizante é bem baixa. Desconsiderando-a dos cálculos, a impedância equivalente é dada por:

$$Z_{rbl} = \frac{V1(rbl)}{I1(rbl)} \quad (20)$$

Assim, para a reatâncias, temos:

$$X1 + X2 = Z1(rbl) * \text{sen}(\theta1)rbl \quad (21)$$

$$X1 + X2 = Z1(rbl) * \text{sen}(\theta1)rbl \quad (22)$$

De acordo com as características do motor, por ele ser categoria N, que de acordo com UMANS (2014) possui conjugado de partida normal e corrente de partida normal, consegue-se:

$$\frac{X1}{2} + \frac{X2}{2} = Z1(rbl) \quad (23)$$

Pelo ensaio a vazio, no intuito de obter os parâmetros do ramo de magnetização, observou-se que a tensão que está encima desse ramo é justamente a tensão induzida do estator para o rotor. Nessa perspectiva, obteve-se: E_l

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_1 - (R1 + jX1) * \vec{I}_1 \quad (24)$$

Para a reatância de dispersão, possuindo a potência reativa, conseguiu-se chegar a:

$$Q_{XM} = Q_{1\phi} - (X1 * I_1^2) \quad (25)$$

$$X_m = \frac{|\vec{E}_1|^2}{Q_{XM}} \quad (26)$$

Se mantendo nesse caminho, a mesma tensão induzida está sobre a resistência de perdas no núcleo. Para tal, utilizou-se do caminho mensurando as potências no cobre do estator (R1) e as rotacionais (Prot). Sendo assim, conseguiu-se:

$$P_{RC} = P_{1\phi} - P_{R1} \quad (27)$$

Possuindo essa potência, a resistência Rc foi:

$$R_c = \frac{|\vec{E}_1|^2}{P_{RC}} \quad (28)$$

Para a determinação da resistência do rotor, partindo de que o ensaio a vazio obteve velocidade nominal, conseguimos mensurar essa resistência por:

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_1 - \vec{I}_m \quad (29)$$

Sendo \vec{I}_m a corrente do ramo de magnetização. Com isso, chegamos a:

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{Z_{ROTOR}^2 - X_2^2} \quad (30)$$

Com os parâmetros já mensurados, começando pelos ensaios feitos nos enrolamentos que dizem respeito a função do transformador, por meio do ensaio a vazio foi possível obter os dados que são representados nas figuras 12 e 13.

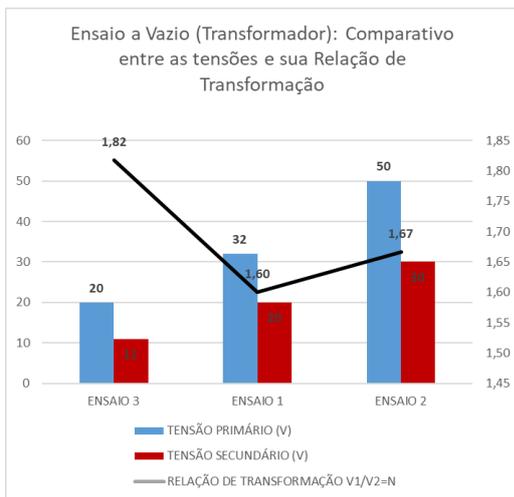


Fig 12 Comparativo entre as tensões do primário e secundário e sua Relação de Transformação no Ensaio a Vazio. Fonte Própria.

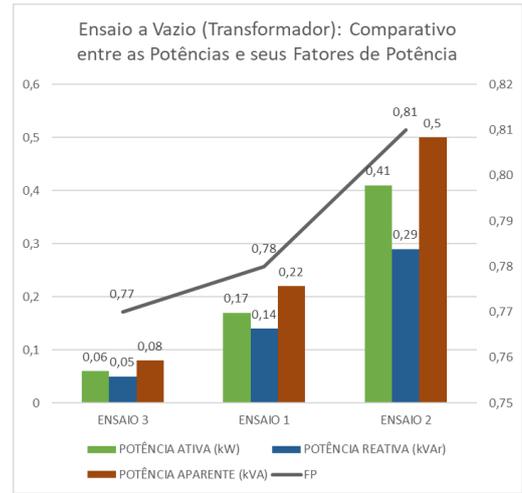


Fig 13 Comparativo entre as potências e seus Fatores de Potência no Ensaio a Vazio para a função transformador. Fonte: Própria

Como segundo, e último, ensaio feito para as bobinas da função do transformador, foi possível obter os seguintes dados, por meio das figuras 14 e 15:

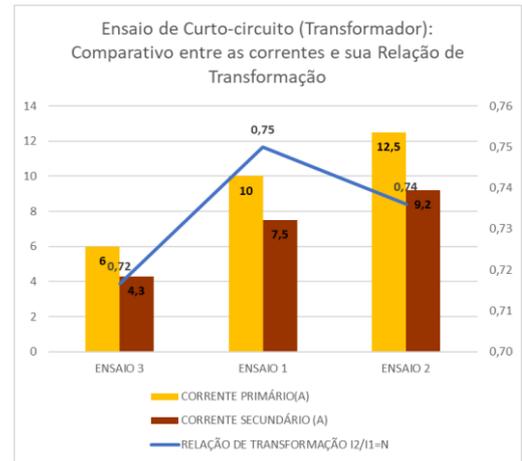


Fig 14 Comparativo entre as tensões do primário e secundário e sua Relação de Transformação no Ensaio de Curto-circuito. Fonte: Própria.

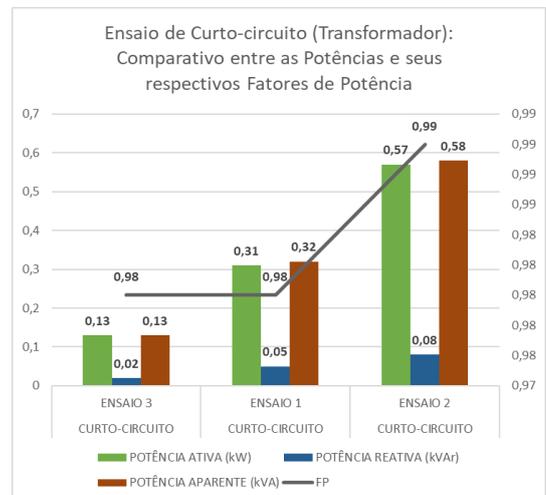


Fig 15 Comparativo entre as potências e seus Fatores de Potência no Ensaio de Curto-circuito. Fonte: Própria.

Após isso, iniciou-se os ensaios para o motor de indução trifásico. Nessa perspectiva, as principais descobertas, realizadas por meio dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado, foram ilustradas na figura 16:

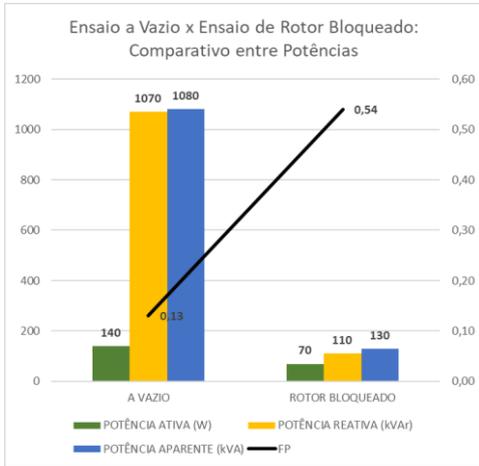


Fig 16 Ensaio a Vazio x Ensaio de Rotor Bloqueado: Comparativo entre Potências. Fonte: Própria.

Tabela III - Resultado dos parâmetros do circuito equivalente da função do transformador

| | |
|-----------|---------------|
| Rc | 6,26 Ω |
| Xm | 7,53 Ω |
| R1 | 1,92 Ω |
| X1 | 0,25 Ω |
| R2 | 0,6 Ω |
| X2 | 0,09 Ω |

Fonte: Própria.

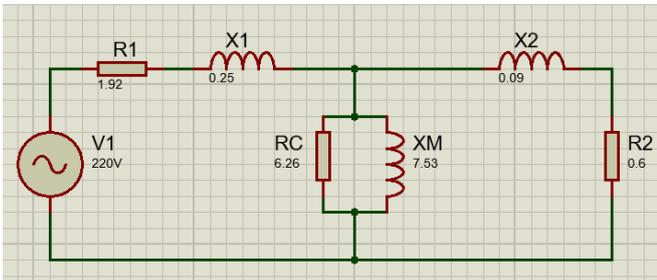


Fig 17 Circuito equivalente, por fase, da função do transformador. Fonte: Própria.

Tabela IV - Resultado dos parâmetros do circuito equivalente da função do motor de indução

| | |
|-----------|-----------------|
| R1 | 1,23 Ω |
| X1 | 1,46 Ω |
| Rc | 651,54 Ω |
| Xm | 44,09 Ω |
| X2 | 1,46 Ω |
| R2 | 30,97 mΩ |

Fonte: Própria.

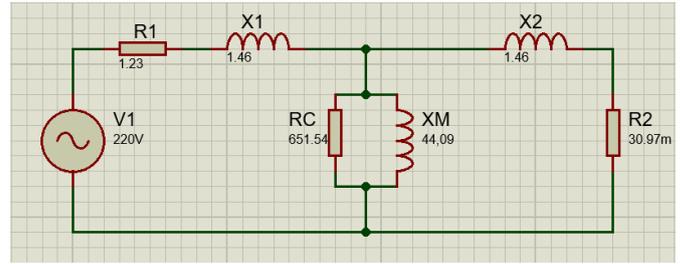


Fig 18 Circuito equivalente, por fase, da função do motor de indução. Fonte: Própria.

Tabela V - Perdas nas funções de motor e transformador

| | Motor | Transformador |
|--|----------|---------------|
| Perdas no Cobre do Estator/Primário (R1) | 34,68 W | 22,92 W |
| Perdas no Núcleo do Estator (Rc) | 70 W | 22,67 W |
| Perdas no Rotor/Secundário (R2) | 373,24 W | 4,01 W |

Fonte: Própria.

Observando os circuitos equivalentes de ambas as funções (Figuras 17 e 18), pode-se notar as diferenças de valores entre os mesmos parâmetros. Isso se deve pelo número voltas nos enrolamentos que cada função tem, que foi definida na hora da alteração da rebobinagem desse motor para se obter esse equipamento especial.

Em posse dos dados de tensão e corrente do primário e secundário da função que diz respeito ao transformador, que é apresentado pelas figuras 12 e 14, partindo da relação de transformação que diz $V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$, consegue-se notar que essa relação é válida enquanto tratamos das tensões, mas quando se trata das correntes, não. No que diz respeito a um transformador abaixador, com tensão do primário maior que a tensão do secundário, a relação de transformação impõe que a corrente do secundário deveria ser maior que a corrente do primário para que as potências de ambos os lados fossem iguais, de acordo com a lei da conservação de energia, mas isso não acontece (mesmo sendo um transformador que não é ideal, o conceito continua o mesmo). Pelos gráficos das figuras 12 e 14 consegue-se inferir que a tensão e corrente do primário é maior que as correspondentes do lado secundário, contrariando, assim, a teoria que rege esse tema. Uma explicação para tal anormalidade é que devido a elevada relutância do entreferro das bobinas do estator, a corrente de magnetização será muito maior em um motor em comparação ao transformador, na qual sua relutância é a mínima possível. Isso evidencia que, mesmo possuindo o mesmo princípio de funcionamento, o motor-transformador é bem menos eficiente que o transformador realizando a alteração dos níveis de tensão.

Visto tudo isso que foi dito até agora, o presente trabalho visou ir atrás de todas essas informações possíveis partindo do princípio de que houvesse uma forma de descobrir um circuito equivalente para a junção motor-transformador com seu pleno funcionamento sendo verídico. Nessa perspectiva, a descoberta principal girou em torno da comprovação do funcionamento dessa junção, na qual o motor conseguiu desempenhar sua função de conversão eletromecânica de

energia e o transformador sua função de conversão eletromagnética de energia, alterando um nível de tensão acionando uma carga qualquer, sem que uma função interferisse no funcionamento da outra. Porém, ao calcular o circuito equivalente das duas funções, descobriu-se valores diferentes para as variáveis que modelam as mesmas perdas em cada função desse equipamento, inferindo-se, assim, que cada função possui seu circuito equivalente particular e que não foi possível formular uma teoria que sustentasse juntar os dois circuitos equivalentes em um só. Isso abre margem para estudos e experiências mais complexas para que se consiga, de fato, provar a existência (ou não) da junção desse circuito equivalente, que para esse nível de pesquisa, não foi possível.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se deu início ao presente trabalho de pesquisa, constatou-se que, apesar de exercerem funções completamente distintas no sistema elétrico, os circuitos equivalentes de um motor de indução trifásico e de um transformador de potência são extremamente parecidos. Nessa linha de raciocínio, juntou-se os dois em um equipamento só, na qual, por meio de enrolamentos em paralelo por fase dentro do estator desse motor, buscou-se estudar sua funcionalidade e propor um circuito equivalente para esse equipamento especial. Como não foi encontrado materiais a respeito desse tema em específico, essa novidade pode vir a ser o início de várias pesquisas na intenção de entender seu funcionamento mais a fundo para, num futuro, entender como esse equipamento pode vir a contribuir com a sociedade.

A pesquisa teve como objetivo geral averiguar a funcionalidade de um motor de indução trifásico que simultaneamente é um transformador (motor-transformador) por meio de enrolamentos em paralelo por fase e propor um circuito equivalente para a junção. Diante disso, apura-se que o objetivo geral foi atendido, porque efetivamente o trabalho conseguiu demonstrar a funcionalidade desse equipamento, uma vez que ligando os enrolamentos do estator em delta, o motor exerceu sua função de giro e, ligando o transformador em estrela, conseguiu-se acoplar carga em seus terminais e fazer um outro motor de indução funcionar também.

Nessa perspectiva, é possível mensurar os parâmetros por fase de cada uma das funções (motor e transformador), porém não foi possível encontrar uma maneira teórica contundente que justificasse essa junção desses dois circuitos equivalentes em apenas um.

Os dois primeiros objetivos específicos propostos foram avaliar as funções do transformador de potência e do motor de indução trifásico por meio de ensaios a vazio, curto-circuito e de rotor bloqueado para determinação de parâmetros de seus respectivos circuitos equivalentes. O sucesso desse objetivo ocorreu pelo suporte, tanto em local, quanto em equipamento, para que se pudesse fazer as montagens e medições com uma grande eficiência. Nessa perspectiva, os objetivos foram atendidos devido aos experimentos acontecerem no laboratório de Máquinas Elétricas, no departamento de Engenharia Elétrica da UFMT, na qual pôde-se usar toda a estrutura necessária que o departamento disponibiliza para que isso fosse possível.

O terceiro objetivo específico foi realizar o funcionamento do motor e, simultaneamente, o transformador por meio dos enrolamentos concêntricos e realizar medições de parâmetros a fim de comparações. Ele foi atendido, colocando-se o motor de indução para exercer sua função de giro e, simultaneamente, o transformador estava abaixando o nível de tensão acionando uma carga, que naquele momento foi um outro motor de indução trifásico conectado em delta.

O quarto objetivo específico ficou a par de verificar a possibilidade de elaboração de um circuito equivalente para essa máquina. Não foi possível atender esse objetivo porque foi encontrado dois circuitos equivalentes, um para motor e outro para o transformador, porém não se encontrou na literatura algo que desse a base para correlacionar ambos.

O último objetivo específico foi o de discutir como que esses parâmetros levantados corroboram para a existência desse circuito equivalente. Não foi atendido porque encontrar parâmetros específicos não ajudou na busca da junção desses circuitos equivalentes, ficando apenas atrelado a sua própria função.

Essa pesquisa partiu da hipótese de que era possível o funcionamento de um motor-transformador e, assim, propor um circuito equivalente, uma vez que seus circuitos equivalentes específicos são extremamente parecidos por causa de seus princípios de funcionamento.

Nessa perspectiva, com o sucesso dos experimentos, a hipótese do funcionamento foi confirmada, pois seu funcionamento se deu de maneira satisfatória, porém, a proposta do circuito equivalente foi refutada porque encontrou-se dois circuitos equivalentes distintos que não se relacionavam, tanto para o transformador como para o motor, por meio de detalhes que iam de encontro com o que é dito na literatura, como a função do transformador não atender a relação de transformação por causa da soma das correntes do primário e de magnetização devido a elevada relutância de entreferro encontrada nos enrolamentos do estator, bem diferente se comparado a um transformador de fato, na qual essa relutância é extremamente pequena.

O problema do circuito equivalente para um motor-transformador foi respondido momentaneamente, mas não se encerra por aqui. Como a ciência é dinâmica e tudo pode mudar em questão de tempo, avalio que pode sim haver um circuito equivalente para essa junção, porém irá exigir uma tecnologia bem mais avançada que a que foi usado neste presente trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAPMAN, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre. AMGH, 2013.
- UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. Ed. Porto Alegre. AMGH, 2014.
- BIM, E. Máquinas elétricas e acionamentos. 2. Ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2012.
- NEVADO, P. P. Popper e a investigação: a metodologia hipotética-dedutiva. Working Paper. 2008. 23f. Technical University of Lisbon, Portugal. 2008.
- KOSOW, I. L. Máquinas elétricas e transformadores. 1. Ed. Porto Alegre. Globo, 1982

