

UNIVERSIDADE DE AVEIRO
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE ÁGUEDA

Módulo temático em tecnologia elétrica

Ensaio de máquinas elétricas

Transformador monofásico e motor de indução trifásico

Orientador:

Professor António BARBOSA

Grupo 5:

Christophe AMORIM, 61470

Eduardo ARAÚJO, 61455

Nuno BAIONETA, 50250

Ricardo SANTOS, 49604

Águeda, 28 de Junho de 2013

Relatório de projeto temático em Tecnologia elétrica

Ensaio de máquinas elétricas

Transformador monofásico e motor de indução trifásico

Autores:

Christophe Amorim

Eduardo Araújo

Nuno Baioneta

Ricardo Santos

Orientador:

Professor António BARBOSA

2º Ano, 2º Semestre

Ano Lectivo 2012/2013

ESTGA - Engenharia Eletrotécnica

Resumo

Frequentando o módulo temático de Tecnologia Elétrica, o grupo desenvolve este projeto com bases nas disciplinas de Eletrotécnica Aplicada e Máquinas Elétricas. Tendo dois objetos de estudo, o projeto divide-se entre eles. Sendo a primeira parte referente a um transformador monofásico e a segunda, um motor assíncrono trifásico (de duas velocidades), tudo fornecido pelo orientador.

Os objetivos são maioritariamente comuns às duas partes. Começando por descrever as características nominais das máquinas efetuando ensaios em vazio, em curto-circuito e em plena carga. Aprofundando as informações, onde conseguimos concluir circuitos equivalentes, vários tipos de perdas e melhores desempenhos (isto para o motor assíncrono trifásico).

De uma forma mais particular, o motor em estudo exigiu uma pesquisa extra, visto ter duas velocidades. Chegando a um melhor rendimento com menos perdas.

Completando o trabalho efetuado com um relatório seguindo os seguintes tópicos: características do transformador monofásico, as suas polaridades, resistência dos enrolamentos, ensaios (em vazio, curto-circuito, com carga e de temperatura), características do motor de indução trifásico, ensaios (em vazio, curto-circuito, plena carga e temperatura) e circuito equivalente.

Abstract

Attending the thematic module Electrical Technology, the group develops this project with bases in the courses of electrical engineering and Applied Electrical Machines.

The project is divided in two parts. The first according to a single-phase transformer and the second, to a three phase asynchronous motor (with two speeds), all provided by the advisor.

The goals mostly common to both parts. Beginning by describe the nominal characteristics of the machines provided by off-load, short-circuit and full-load tests. Developing the information, we can achieve equivalent circuits, various types of losses and better performances (this for the three phase asynchronous motor).

In a particular way, the motor studied required an extra search, by the fact of having two speeds. Getting a better performance with less energy loss.

Completing the work with a report based on the next topics: characteristics of the single-phase transformer, its polarities, winding resistances, tests (off-load, short-circuit, full-load and temperature), characteristics of the three-phase induction motor, tests (off-load, short-circuit, full-load and temperature) and equivalent circuit.

Índice

1	Introdução	1
2	Transformador monofásico	2
2.1	Polaridade do transformador	3
2.2	Resistência dos enrolamentos	3
2.3	Ensaio em vazio	4
2.4	Ensaio em curto-circuito	5
2.5	Circuito equivalente	7
2.6	Ensaio em carga	7
2.7	Ensaio de temperatura	9
3	Motor de indução trifásico	10
3.1	Resistência dos enrolamentos	11
3.2	Ensaio em vazio	11
3.3	Ensaio com bloqueio do rotor (cc)	13
3.4	Circuito equivalente	14
3.5	Ensaio em carga	15
3.6	Ensaio de temperatura	16
4	Conclusões	17
	Bibliografia	18
	Anexos	19
Anexo A	Enunciado do projeto	20
Anexo B	Polaridade dos enrolamentos	22
Anexo C	Resistência dos enrolamentos	24
Anexo D	Valores dos ensaios do transformador em vazio e em curto-circuito	26
Anexo E	Ensaio do motor em vazio	28

Índice de figuras

1	Transformador utilizado	2
2	Circuito equivalente de um transformador reduzido ao primário	3
3	Circuito utilizado no ensaio em vazio	4
4	Triângulo de potências do transformador em vazio	5
5	Circuito utilizado no ensaio em curto-circuito	6
6	Circuito equivalente do transformador em estudo	7
7	Circuito utilizado no ensaio em carga	7
8	Gráfico tempo(minutos)-temperatura(°C)	9
9	Motor utilizado	10
10	Circuito equivalente do motor	10
11	Modelo em estrela dos enrolamentos	11
12	Esquemas de ligação no ensaio em vazio	12
13	Gráfico Tensão-Potência absorvida	13
14	Circuitos equivalentes em triângulo	15
15	Motor em carga	15
16	Gráfico tempo(minutos)-temperatura(°C) no motor	16

ANEXOS

17	Polaridade por impulso indutivo	22
18	Polaridade por tensão alternada	23
19	Medição da resistência dos enrolamentos pelo método Voltímetro-Amperímetro	25

Índice de tabelas

1	Características do transformador	2
2	Valores de resistência obtidos pelos diferentes métodos	4
3	Valores obtidos à tensão nominal no ensaio do transformador em vazio	4
4	Valores obtidos no ensaio do transformador em curto-circuito à corrente nominal	6
5	Valores obtidos no ensaio do transformador em carga	8
6	Rendimento para as diferentes cargas	8
7	Regulação do transformador	9
8	Valores medidos das resistências estatóricas em Ohm	11
9	Valores obtidos nos ensaios em vazio para o método dos dois wattímetros	12
10	Valores obtidos nos ensaios com rotor bloqueado	14
11	Valores obtidos no ensaio em carga	15

ANEXOS

12	Valores obtidos no método de polaridade por tensão alternada	23
13	Valores de resistência medidos diretamente pelo ohmímetro	24
14	Cálculo da resistência do primário pela lei de ohm	25
15	Cálculo da resistência do secundário pela lei de ohm	25
16	Valores obtidos no ensaio do transformador em vazio	26
17	Valores obtidos no ensaio do transformador em curto-circuito	27
18	Ensaio em vazio para $2p = 4$	28
19	Ensaio em vazio para $2p = 2$	29

Lista de símbolos e abreviaturas

Notação

P_0	Valor em vazio
P_{cc}	Valor em curto-circuito
V	Valor eficaz
v	Valor instantâneo
V_M	Valor máximo
\underline{V}	Fasor

Unidades

I	Corrente elétrica	(A)
P	Potência ativa	(W)
Q	Potência reativa	(var)
R	Resistência elétrica	(Ω)
S	Potência aparente	(VA)
V/U	Tensão elétrica	(V)
X	Reatância elétrica	(Ω)
Z	Impedância elétrica	(Ω)

1. Introdução

No âmbito do módulo temático em Tecnologia Elétrica foi proposto a realização de um projeto que tem como principal objetivo o estudo de duas máquinas elétricas: um transformador monofásico e um motor de indução trifásico.

Assim sendo, o relatório encontra-se dividido em duas partes principais: O estudo do transformador monofásico, onde serão conhecidos vários parâmetros do transformador, tais como: polaridade, resistência dos enrolamentos, circuito equivalente, constante de temperatura, rendimento com diferentes cargas, entre outros. Na segunda parte, dedicada ao estudo do motor trifásico serão dados a conhecer aspetos como resistência nos enrolamentos, as potências absorvidas e de perdas, temperaturas de serviço, deslizamento, entre outros.

Durante estas mesmas partes também serão dados a conhecer quer os princípios básicos de um transformador, bem como os princípios básicos de um motor trifásico. Além destes princípios, também serão dados a conhecer os ensaios que foram necessários para conhecer as principais características das máquinas alvo de estudo. Neste relatório, estarão expostas as principais dificuldades enfrentadas pelo grupo, bem como os resultados obtidos.

2. Transformador monofásico

Um transformador é uma máquina elétrica que tem como principais funções a transformação de correntes ou tensões, ou de modificar valores de impedâncias em circuitos elétricos. Funcionam por indução de corrente, segundo as leis de eletromagnetismo, onde é afirmado, que é possível criar uma corrente elétrica num circuito quando submetido a um campo magnético variável, sendo esta a razão destas máquinas apenas funcionarem em corrente alternada. Um transformador é composto principalmente por dois componentes: enrolamentos, um conjunto de bobinas geralmente feitas em cobre; E núcleo, feito a partir dum material ferromagnético. No presente capítulo, vamos conhecer as propriedades destes componentes bem como o seu funcionamento.

No estudo do transformador foi utilizado um transformador existente na ESTGA(ver figura 1). Cujo fabricante e modelo não se encontra identificado.

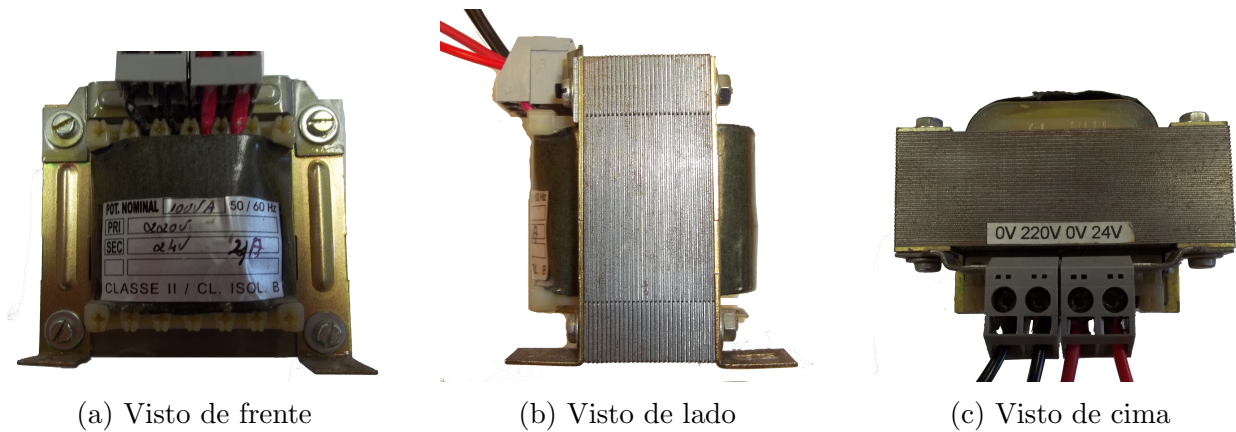


Figura 1: Transformador utilizado

Trata-se de um transformador monofásico, cuja tensão nominal no primário é de $220V_{AC}$ e a tensão nominal no secundário é de $24V_{AC}$ (razão de transformação $rt = \frac{V_2}{V_1} = \frac{24}{220} = 0.109$), estes e outros valores lidos na chapa de características estão na tabela 1, tal como os valores de corrente nominais calculados através da expressão $I_N = \frac{S_N}{V_N}$.

Tabela 1: Características do transformador

$S(VA)$	Frequência(Hz)	$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$
100	50/60	220	24	0.455	4.167

Partindo do circuito equivalente aproximado de um transformador (ver figura 2), pretende-se determinar os parâmetros do transformador em estudo e, para isso, recorreu-se aos ensaios de polaridade, resistência, em vazio, em carga e em curto-circuito.

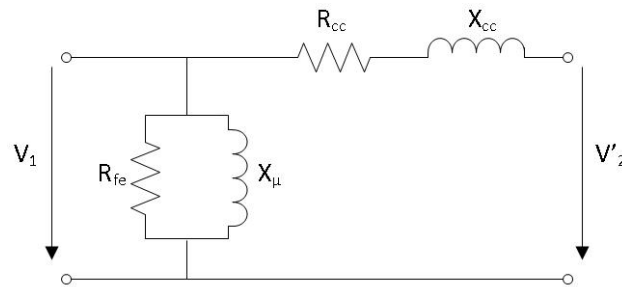


Figura 2: Circuito equivalente de um transformador reduzido ao primário

2.1 Polaridade do transformador

Para determinar a polaridade dos enrolamentos do transformador, seguiu-se a norma *IEEE Std C57.19.91-2011* [1] que sugere os métodos de determinação da polaridade dos enrolamentos em transformadores monofásicos por:

1. Impulso indutivo;
2. Tensão alternada;
3. Comparação;
4. *Ratio Bridge*.

A descrição e resultados dos métodos acima enumerados encontra-se no anexo B. Os métodos utilizados determinaram a polaridade dos enrolamentos como sendo subtrativa, resultando num desfasamento nulo entre as tensões no primário e no secundário.

2.2 Resistência dos enrolamentos

Para determinar a resistência elétrica dos enrolamentos, seguiu-se a norma *IEEE Std 118-1978* [2]. Esta norma sugere alguns métodos para determinação de resistências. Os métodos seguidos foram:

- Ohmímetro;
- Voltímetro-Amperímetro;

Sendo R_1 a resistência do enrolamento primário e R_2 a resistência do enrolamento secundário. Os métodos e resultados detalhados encontram-se descritos no anexo C. A tabela 2 mostra o resumo dos valores obtidos pelos diferentes métodos.

Tabela 2: Valores de resistência obtidos pelos diferentes métodos

Resistência	Ohmímetro(Ω)	Voltímetro- Amperímetro(Ω)
R_1	19.5	21.08
R_2	0.6	0.98

2.3 Ensaio em vazio

Efetuuou-se o ensaio do transformador sem carga, num circuito semelhante ao da figura 3.

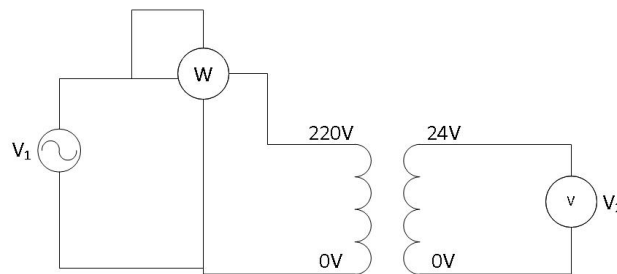


Figura 3: Circuito utilizado no ensaio em vazio

Aplicou-se uma tensão alternada, V_1 , obtendo-se os valores de corrente no primário, potência (ativa, aparente e reativa) e fator de potência. A tabela completa de valores encontra-se no anexo D e os valores obtidos à tensão nominal encontram-se na tabela 3.

Tabela 3: Valores obtidos à tensão nominal no ensaio ensaio do transformador em vazio

$V_{10}(V)$	$V_{20}(V)$	$I_{10}(A)$	$P_0(W)$	$\cos(\varphi)$	$Q(var)$	$S(VA)$
220.90	25.30	0.055	3.0	0.25	11.7	12.1

De seguida apresentam-se os cálculos de parâmetros do transformador a partir do ensaio em vazio.

Fator de potência em vazio

É calculado pela expressão $\cos(\varphi) = \frac{P_0}{S_0} = \frac{3.0}{12.1} \approx 0.248$, o que confirma o valor lido no wattímetro. Obtém-se assim o ângulo de defasamento $\varphi = \arccos(0.248) \approx 75.64^\circ$

Com os valores de potência e defasamento obtidos é possível construir o triângulo de potências do transformador em vazio que se encontra na figura 4.

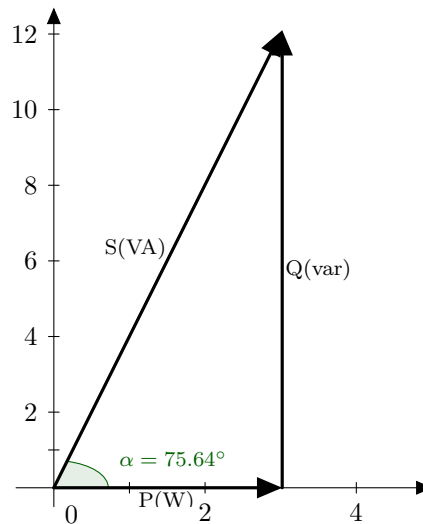


Figura 4: Triângulo de potências do transformador em vazio

Resistência do ferro

Representa as perdas no ferro e é calculada da seguinte forma $R_{fe} = \frac{V_1^2}{P_0} = \frac{220.9^2}{3.0} \approx 16.3k\Omega$.

Reatância de magnetização

É possível determinar a reatância de magnetização através da expressão $X_\mu = \frac{V_1^2}{Q_0} = \frac{220.9^2}{11.7} \approx 4.2k\Omega$.

Módulo da impedância no primário

A partir dos valores de tensão e corrente no ensaio em vazio, calcula-se $|Z_1| = \frac{V_1}{I_1} = \frac{220.9}{0.055} \approx 4.016k\Omega$.

2.4 Ensaio em curto-circuito

No ensaio em curto-circuito do transformador, ligou-se o esquema da figura 5 e obtiveram-se os valores presentes no anexo D.

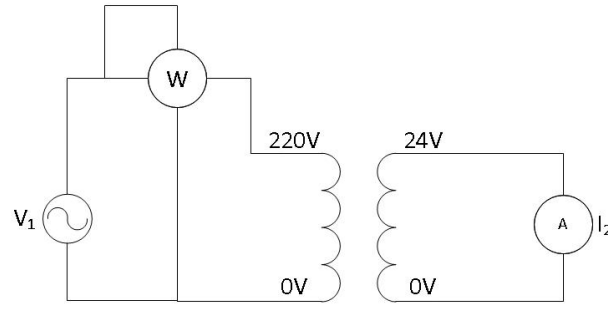


Figura 5: Circuito utilizado no ensaio em curto-circuito

Variou-se a tensão V_1 até se obterem as correntes máximas nominais do transformador. Com estes valores de corrente foi obtido o ensaio da tabela 4.

Tabela 4: Valores obtidos no ensaio do transformador em curto-circuito à corrente nominal

$V_1(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$P_{cc}(W)$	$\cos(\varphi)$	$Q_{cc}(var)$	$S_{cc}(VA)$
24.70	0.458	4.110	11.3	0.99	1.5	11.4

Segue-se o cálculo de alguns parâmetros do transformador a partir do ensaio em curto-circuito.

Tensão de curto-circuito

Para obter os valores de corrente nominais no primário e secundário, é necessário aplicar ao primário uma tensão(V_1) de 24.70V. O que corresponde a 11.23% da tensão nominal.

Resistência de curto-circuito

Com os valores obtidos no ensaio em curto-circuito é possível obter o valor da resistência equivalente do transformador em curto-circuito, $R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_1^2} = \frac{11.3}{0.458^2} \approx 53.87\Omega$.

Reatância de curto-circuito

À semelhança do cálculo da resistência de curto-circuito, é também possível determinar a reatância de curto-circuito. A partir dos valores de potência reativa e de corrente obtém-se $X_{cc} = \frac{Q_{cc}}{I_1^2} = \frac{1.5}{0.458^2} \approx 7.15\Omega$.

Impedância de curto-circuito

Obtidos os valores de resistência e reatância de curto-circuito, sabe-se o valor da impedância de curto-circuito, $Z_{cc} = (53.87 + j7.15)\Omega$. É possível também calcular o módulo da im-

pedância, $|Z_{cc}| = \sqrt{53.87^2 + 7.15^2} \approx 54.34\Omega$.

2.5 Circuito equivalente

A partir dos valores calculados nos ensaios em vazio e em curto-circuito, é possível obter os valores do esquema da figura 6, que representa o circuito equivalente do transformador em estudo reduzido ao primário.

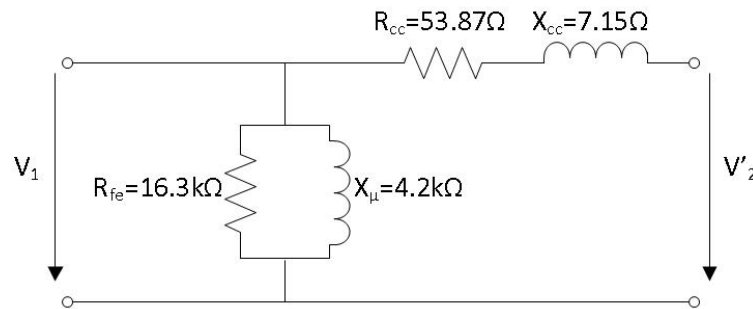


Figura 6: Circuito equivalente do transformador em estudo

2.6 Ensaios em carga

Realizou-se ensaios com o transformador carregado, a diferentes valores de carga. Para o ensaio à plena carga seria necessária uma carga de $R \approx 5.76\Omega$, porém não existem cargas desta gama de valores na ESTGA, razão pela qual não se realizou este ensaio.

Ligou-se então o esquema da figura 7 e obtiveram-se os dados da tabela 5.

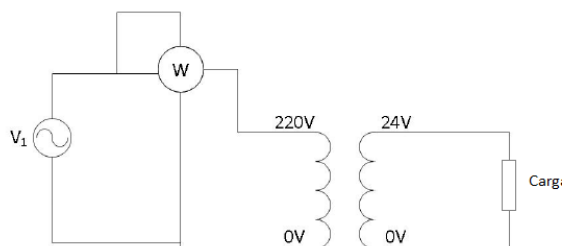


Figura 7: Circuito utilizado no ensaio em carga

Rendimento e regulação do transformador

Calculou-se o rendimento do transformador para as diferentes cargas através do método direto $\eta = \frac{P_2}{P_1}$. Resultando os valores da tabela 6. Calculou-se ainda o fator de carga para o qual o transformador em estudo apresenta o maior rendimento, segundo a expressão

Tabela 5: Valores obtidos no ensaio do transformador em carga

$Carga(\Omega)$	7.5	15.0	33.0	56.0
$V_1(V)$	220.9	221.2	221.2	221.1
$I_1(A)$	0.366	0.202	0.111	0.082
$P_1(W)$	80.0	43.2	21.5	13.8
$Q_1(var)$	11.6	11.3	11.7	11.7
$S_1(VA)$	80.8	44.7	24.5	18.1
$\cos(\phi_1)$	0.99	0.97	0.88	0.76
$V_2(V)$	23.7	24.6	25.1	25.3
$I_2(A)$	3.040	1.600	0.750	0.453
$P_2(W)$	72.2	39.3	18.9	11.5
$Q_2(var)$	0.0	0.0	0.0	0.0
$S_2(VA)$	72.2	39.3	18.9	11.5
$\cos(\phi_2)$	1.00	1.00	1.00	1.00
rt	0.11	0.11	0.11	0.11

$C_{\eta max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{3.0}{11.3}} = 0.52[3]$. O que significa que o transformador tem o seu máximo rendimento a aproximadamente meia carga.

Tabela 6: Rendimento para as diferentes cargas

$Carga(\Omega)$	7.5	15.0	33.0	56.0
$P_1(W)$	80.0	43.2	21.5	13.8
$P_2(W)$	72.2	39.3	18.9	11.5
η	0.90	0.91	0.88	0.83

Quando o transformador é carregado, existe uma queda de tensão no secundário. A relação entre a tensão no secundário em circuito aberto e em carga é denominada de regulação do transformador. Para este cálculo utilizou-se a seguinte expressão:

$$Reg = \left(\frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \right) * 100\%$$

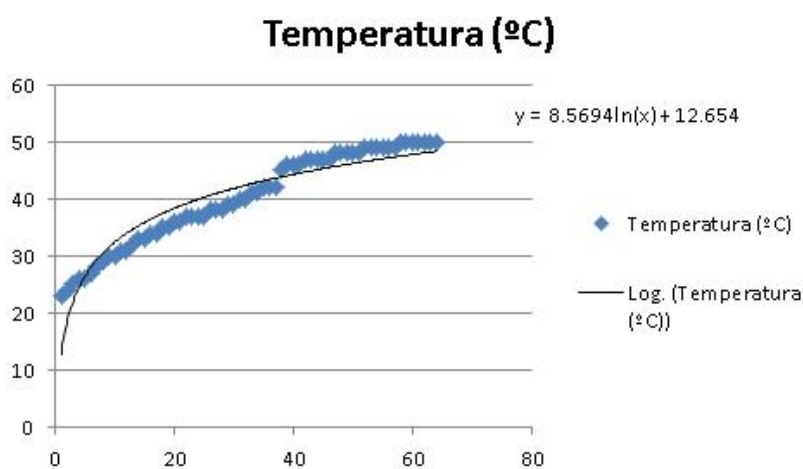
O que resultou nos valores da tabela 7, para as diferentes cargas.

Tabela 7: Regulação do transformador

$Carga(\Omega)$	7.5	15.0	33.0	56.0
$Reg(\%)$	6.32	2.76	0.79	0.00

2.7 Ensaio de temperatura

Realizou-se um teste de temperatura com o transformador carregado, com uma carga resistiva de 7.5Ω a uma temperatura ambiente de $25^{\circ}C$, obtendo-se o gráfico tempo-temperatura da figura 8.

Figura 8: Gráfico tempo(minutos)-temperatura($^{\circ}C$)

3. Motor de indução trifásico

Sendo uma máquina elétrica que tem como principal função transformar energia elétrica em energia mecânica. É constituído principalmente pelo estator e o rotor, sendo a primeira a parte estática e a segunda a parte móvel. Também esta máquina funciona segundo os princípios de eletromagnetismo, portanto através de um campo eletromagnético criado pela tensão aplicada aos enrolamentos do estator provocando movimento por magnetismo no rotor. Neste capítulo serão dados a conhecer os vários ensaios e cálculos feitos para conhecer melhor o funcionamento e características desta máquina elétrica.

Pretende-se estudar o funcionamento de um motor de indução trifásico. O motor a estudar (ver figura 9) é um motor de duas velocidades com rotor em gaiola de esquilo. A velocidade do motor depende da ligação do mesmo.

O princípio de funcionamento para a alteração de velocidades no motor em estudo é a comutação de 1 par de polos ($2p = 2$) para $2(2p = 4)$, obtendo assim velocidades de sincronismo (n_s) de $3000rpm$ e $1500rpm$ respetivamente.



Figura 9: Motor utilizado

Partindo do circuito equivalente aproximado da máquina assíncrona trifásica (ver figura 10), pretende-se calcular os valores do circuito para o motor em estudo recorrendo-se a ensaios em vazio, rotor travado e em carga.

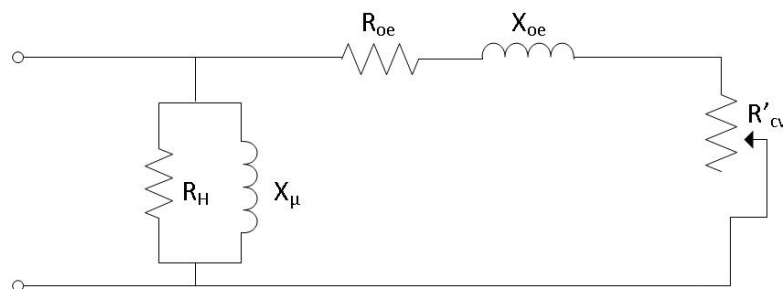


Figura 10: Circuito equivalente do motor

3.1 Resistência dos enrolamentos

Realizou-se, à semelhança do ocorrido com o transformador, a medição da resistência dos enrolamentos. Para o motor apenas se utilizou o método do ohmímetro.

Na medição de resistência considerou-se o modelo de enrolamentos em estrela, como mostra a figura 11.

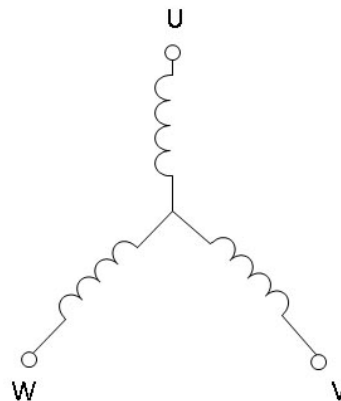


Figura 11: Modelo em estrela dos enrolamentos

Os valores encontram-se na tabela 8.

Tabela 8: Valores medidos das resistências estatóricas em Ohm

	R_{UV}	R_{UW}	R_{VW}	Média
$2p = 2$	93.1	93.7	94.3	93.70
$2p = 4$	93.2	94.0	93.4	93.53

Por se considerar o modelo em estrela a medição corresponde à resistência de dois enrolamentos.

3.2 Ensaio em vazio

De seguida realizou-se o ensaio do motor sem carga. Como referido anteriormente o motor apresenta duas configurações de ligação, uma para velocidades mais altas e outra para velocidades mais baixas, portanto realizou-se o ensaio em vazio para as duas configurações. Seguiu-se os esquemas 12a e 12b para as velocidades baixa e alta, respetivamente, e para a medição da velocidade utilizou-se o tacómetro *Lutron DT-2236*[4] que para velocidades acima das $1000rpm$ apresenta uma resolução de $1rpm$.

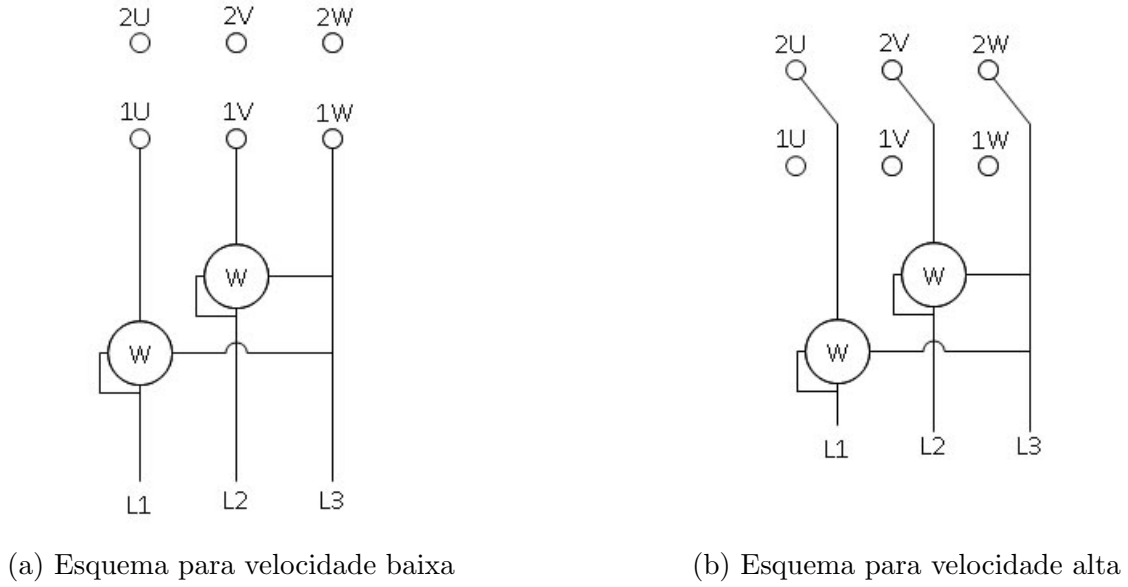


Figura 12: Esquemas de ligação no ensaio em vazio

Os valores obtidos à tensão e frequência nominais encontram-se na tabela 9. O anexo E contém todos os valores adquiridos num ensaio paralelo utilizando o método dos 3 wattímetros.

Tabela 9: Valores obtidos nos ensaios em vazio para o método dos dois wattímetros

	$2p = 4$		$2p = 2$	
	W_1	W_2	W_1	W_2
$V(V)$	376.6	384.0	377.5	382.8
$I(A)$	0.494	0.537	0.346	0.431
$P(W)$	-66.7	137.7	-33.2	113.4
$n(rpm)$	1495		2985	

O que se traduz numa potência absorvida em vazio de

$$P_0 = P_{W_1} + P_{W_2} = \begin{cases} -66.7 + 137.7 = 71.0W & (2p=4) \\ -33.2 + 113.4 = 80.2W & (2p=2) \end{cases}$$

Calcula-se a potência aparente através da média das tensões e correntes lidas.

$$S = \sqrt{3} * U_0 * I_0 = \begin{cases} \sqrt{3} * 380.3 * 0.515 = 339.2VA & (2p=4) \\ \sqrt{3} * 380.15 * 0.389 = 256.1VA & (2p=2) \end{cases}$$

E o fator de potência

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \begin{cases} \frac{71.0}{339.2} = 0.209 & (2p=4) \\ \frac{80.2}{256.1} = 0.313 & (2p=2) \end{cases}$$

Calculando os deslizamentos para as duas velocidades

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \begin{cases} 0.33\% & (2p=4) \\ 0.50\% & (2p=2) \end{cases}$$

As perdas por efeito de Joule no estator podem então ser calculadas por:

$$p_{je} = 3 * R_e * I^2 = \begin{cases} 3 * 46.8 * 0.515^2 = 37.31W & (2p=4) \\ 3 * 46.9 * 0.389^2 = 21.29W & (2p=2) \end{cases}$$

Através da aproximação do gráfico de potência absorvida em função da tensão de alimentação representado na figura 13, é possível calcular o valor de perdas mecânicas, dado por $P(0) = 0.1403 * 0^2 - 0.2725 * 0 + 3.9431 = 3.9431W$.

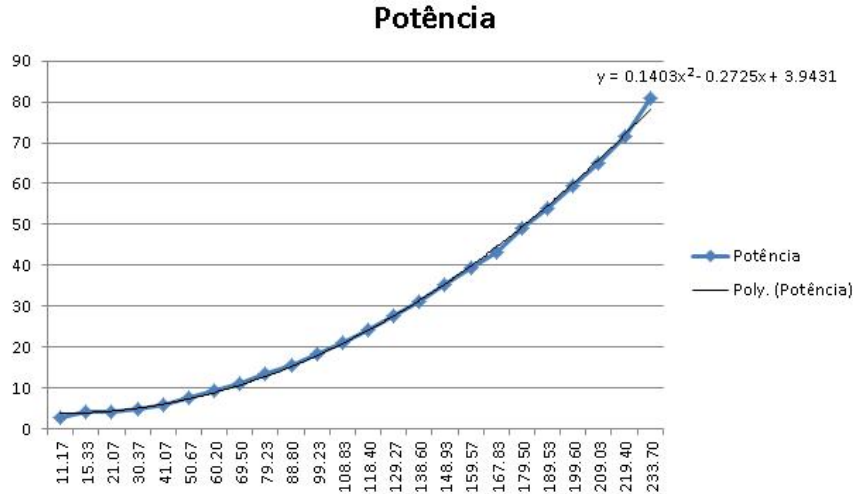


Figura 13: Gráfico Tensão-Potência absorvida

3.3 Ensaio com bloqueio do rotor (cc)

Para a execução deste ensaio, bloqueou-se o rotor, aplicou-se uma tensão crescente ao estator até que a corrente absorvida fosse igual à corrente nominal do motor. Devido à inexistência de informações como a potência do motor ou corrente nominal, estimou-se o valor de potência do motor em $P = 550W$ com um rendimento de $\eta = 0.8$ e um fator de potência de $\cos \phi = 0.75$, sendo assim possível calcular o valor de corrente nominal,

$I_n = \frac{P_{abs}}{3 * U_s * \cos \phi} = \frac{\frac{550}{0.8}}{3 * 220 * 0.75} \approx 1.4A$. Efetuando o ensaio com uma corrente nominal de 1.4A obteve-se os valores da tabela 10 para $2p = 2$ e para $2p = 4$ utilizando o método dos 3 wattímetros.

Tabela 10: Valores obtidos nos ensaios com rotor bloqueado

	$U_{cc}(V)$	$I(A)$	$P_{cc}(W)$
$2p = 2$	142.03	1.43	527.1
$2p = 4$	147.13	1.41	525.3

Fator de potência

Calculando o fator de potência na condição de rotor bloqueado:

$$\cos \phi = \frac{P_{cc}}{3 * U_{cc} * I_{cc}} = \begin{cases} 0.87 & (2p=2) \\ 0.87 & (2p=4) \end{cases}$$

3.4 Circuito equivalente

A partir do ensaio com o rotor bloqueado calcula-se:

$$R_{oe} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = \begin{cases} \frac{527.1}{3 * 1.43^2} = 28.6\Omega & (2p=2) \\ \frac{525.3}{3 * 1.41^2} = 29.4\Omega & (2p=4) \end{cases}$$

e:

$$X_{oe} = R_{oe} * \tan \phi_{cc} = \begin{cases} 28.6 * \tan(\cos^{-1}(0.87)) = 16.21\Omega & (2p=2) \\ 29.4 * \tan(\cos^{-1}(0.87)) = 16.66\Omega & (2p=4) \end{cases}$$

Sendo a resistência equivalente do rotor reduzida ao estator $R'_r = R_{oe} - R_e$ obtém-se $R'_r = 93.6\Omega$

$$R_H = \frac{U_v}{I_H} = \begin{cases} 490.1\Omega & (2p=2) \\ 645.5\Omega & (2p=4) \end{cases}$$

$$X_\mu = \frac{U_v}{I_\mu} = \begin{cases} 878.3\Omega & (2p=2) \\ 1155.2\Omega & (2p=4) \end{cases}$$

Resultando no circuito da figura 14a para $2p=2$ e da figura 14b para $2p=4$.

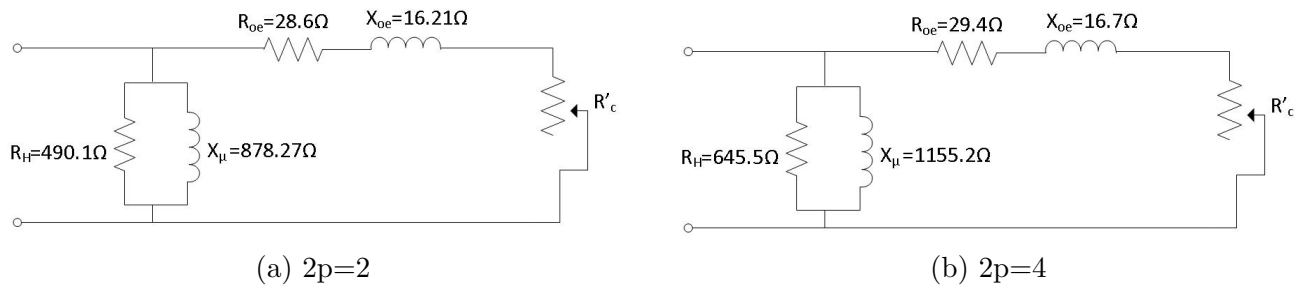


Figura 14: Circuitos equivalentes em triângulo

3.5 Ensaio em carga

Realizou-se um ensaio em carga com o motor acoplado à carga da figura 15, com um valor de $0.5Nm$, o motor ligou-se nas duas velocidades disponíveis obtendo-se os valores da tabela 11 através do método dos 3 wattímetros.



Figura 15: Motor em carga

Tabela 11: Valores obtidos no ensaio em carga

	$U(V)$	$I(A)$	$P_{abs}(W)$	$S(VA)$	$\cos \phi$	$n(RPM)$
$2p = 4$	219.7	0.511	118.9	337.1	0.35	1477
$2p = 2$	220.6	0.429	170.0	283.9	0.60	2917

É então possível calcular a potência mecânica transferida à carga através da expressão $P = \frac{2\pi * n * T}{60}$ o que resulta numa potência de $77.34W$ para $2p = 4$ e de $152.73W$ para $2p = 2$.

Sendo o rendimento do motor a razão entre a potência fornecida à carga e a potência absorvida ($\eta = \frac{P_{mecanica}}{P_{abs}}$) obtém-se um rendimento de 65.1% para $2p = 4$ e 89.8% para $2p = 2$.

3.6 Ensaio de temperatura

Realizou-se um ensaio de temperatura com o motor a funcionar em vazio, recolhendo-se valores de temperatura igualmente espaçados no tempo, resultando o gráfico da figura 16.

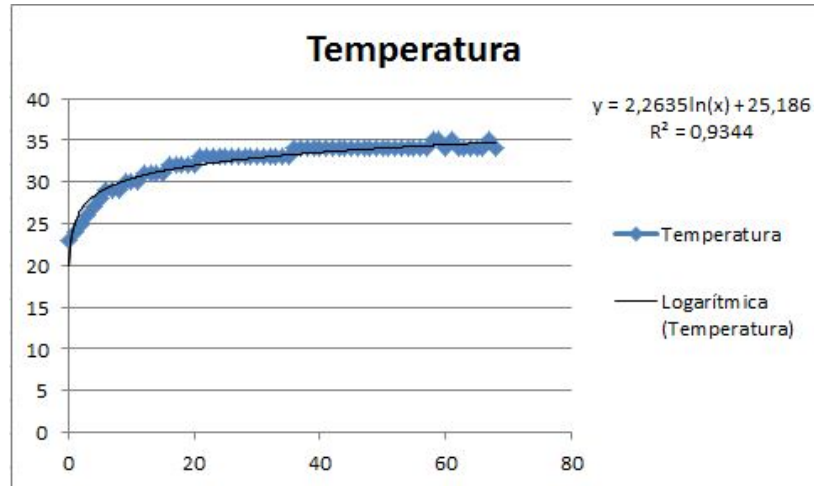


Figura 16: Gráfico tempo(minutos)-temperatura(°C) no motor

4. Conclusões

Este projeto consistiu no estudo de duas máquinas elétricas de uso comum, o transformador monofásico e o motor de indução trifásico.

Com um transformador usual realizou-se vários testes, para conhecer as suas características, tais como polaridade, parâmetros do circuito equivalente e constante tempo térmica. Por ser um transformador comercial, apresenta uma boa construção, o que se traduz num alto rendimento comparado com transformadores didáticos.

Por sua vez, o motor de indução trifásico estudado foi construído para fins didáticos, apresentando defeitos na sua construção que se traduzem em fracos rendimentos e consumos por fase desequilibrados. Este facto poderá também ser explicado por curto-circuitos dos enrolamentos causados pelo sobreaquecimento do motor. Devido à falta de documentação acerca do motor, estimaram-se os valores nominais para que fosse possível a sua utilização.


Através dos ensaios efetuados em ambas as máquinas, foi possível determinar os seus parâmetros e estudar o seu funcionamento. Devido à utilização de modelos equivalentes aproximados, os resultados obtidos poderão não ser precisos.

Bibliografia

- [1] IEEE, “Standard test code for dry-type distribution and power transformers,” 2011. Revision of IEEE Std C57.12.91-2001.
- [2] IEEE, “Standard test code for resistance measurement,” 1978. Revision of IEEE Std118-1949.
- [3] A. Sá, “Apontamentos de máquinas elétricas,” 2012/2013.
- [4] LUTRON, *DIGITAL PHOTO/CONTACT TACHOMETER Model : DT-2236*.
- [5] W. Meterman, *Model 23XT,25XT,27XT,28XT Digital Multimeter Operator’s Manual*, 2000. Manual Revision 08/00 Rev A.
- [6] UNI-T, *UNI-T Model UT201/202: Operating Manual*, 2001.

Anexos

A. Enunciado do projeto

 Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda Universidade de Aveiro	PROJECTO X	Módulo temático: Tecnologia Elétrica 2º ano 2º Semestre
	RESUMO	

Identificação do projecto

Título:

Ensaio de máquinas elétricas - transformador monofásico e motor de indução.

O trabalho envolve duas máquinas elétricas, o transformador monofásico e o motor de indução trifásico. Serão realizados ensaios que poderão ser de rotina, de conformidade, de confirmação para o projeto, ou outros.

A determinação de qualquer parâmetro ou referência seja ou não com recurso a ensaios, deverá ser realizada após se estabelecer por escrito:

- Qual ou quais os métodos a utilizar e porquê.
- Quais os equipamentos e aparelhos de medida necessários.
- Quais as vantagens e inconvenientes de cada método.

(Um texto com a redação dos procedimentos é de grande interesse.)

Transformador monofásico.

Determinar ou identificar, com ensaios:

- A polaridade dos enrolamentos primário e secundário.
- As resistências dos enrolamentos do primário e secundário.
- A potência de perdas em vazio. A corrente de excitação.
- A potência de perdas com a carga.
- A potência de perdas total
- As temperaturas de serviço à plena carga.

Calcular e identificar:

- Os terminais dos enrolamentos.
- A regulação do transformador.
- O rendimento com diversas cargas (pelo menos com $4/4$, $3/4$, $2/4$, $1/4$ de carga).
- A impedância de curto circuito.
- Os parâmetros do (ou dos) circuito equivalente.
- Determinar e, ou, confirmar a potência nominal da máquina, a corrente absorvida e o fator de potência.
- As diversas perdas discriminadas com diversas carga.
- A temperatura e constante de tempo térmica.
- Caracterizar - a forma de onda da corrente em vazio e à plena carga.


Motor de indução trifásico

Determinar ou identificar, com ensaios:

- As resistências dos enrolamentos do estator.
- A potência de perdas mecânica.
- A potência absorvida em vazio (P, Q e S).
- As temperaturas de serviço à plena carga.

Calcular e identificar (a partir de ensaios em vazio e com o rotor bloqueado):

- O deslizamento em vazio (a partir de dados medidos) e estimar o deslizamento com diversas cargas.
- Os parâmetros do (ou dos) circuito equivalente.
- Determinar e, ou, confirmar a potência nominal da máquina, a corrente absorvida e o fator de potência..
- O rendimento com diversas cargas (pelo menos com $4/4$, $3/4$, $2/4$, $1/4$ de carga).
- As diversas perdas discriminadas com diversas carga.
- A temperatura e constante de tempo térmica do estator.

 <small>Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda</small> <small>Universidade de Aveiro</small>	PROJECTO 1	Módulo temático: Tecnologia Elétrica 2º ano 2º Semestre
	RESUMO	

Página 2 de 2

O trabalho deverá, sempre, incluir:

- 1- Desenho. esquemático dos circuitos realizados.
- 2- Cálculos necessários para obter os parâmetros e que serviram de apoio a escolhas de procedimentos e montagens. Poderão ser realizados programas em "excel" ou de outra forma que optarem e considerarem de interesse.
- 3- Realização de montagens, medidas e testes.
- 4- Realização de notas técnicas para consulta posterior por outros, adequadas ao trabalho realizado.
- 5- Relatório final do trabalho.

Tarefas resumidas. Datas chave.

Data de constituição do grupo / Início dos trabalhos: 27 / 02 / 2013.

Primeira reunião: data a definir

Pesquisa bibliográfica. Definição de procedimentos de cálculo: 13 / 03 / 2013

Data de termo do programa preliminar / 1ª versão do plano de trabalhos:

Data de realização dos ensaios e medidas – a definir.

Data prevista para termo dos ensaios – a definir.

Data para termo do relatório, versão preliminar – a definir.

Data para termo e entrega do relatório – 8 dias antes das provas de apresentação e defesa.

Período da apresentação e defesas, dia a definir: 3 a 9 de Julho de 2013

2012 - 2013

barbosa@ua.pt

B. Polaridade dos enrolamentos

Impulso indutivo

O método do impulso indutivo consiste em:

1. aplicar uma tensão DC ao enrolamento primário;
2. ligar um voltímetro ao enrolamento secundário;
3. desligar a fonte de excitação do enrolamento primário, e assim provocar um choque indutivo no enrolamento secundário;
4. avaliar a variação da tensão, mostrada pelo voltímetro, no enrolamento secundário.

Caso a tensão verificada no passo 4 seja positiva a polaridade dos enrolamentos é aditiva, caso seja negativa a polaridade é subtrativa.

Ensaiou-se várias vezes o transformador em estudo, ligado conforme o esquema da figura 17, com tensões DC no primário de:

- $50V_{DC}$
- $75V_{DC}$
- $100V_{DC}$

e, desligando a fonte, observaram-se os seguintes valores no voltímetro, respetivamente:

- $-0.55V$
- $-0.44V$
- $-0.25V$

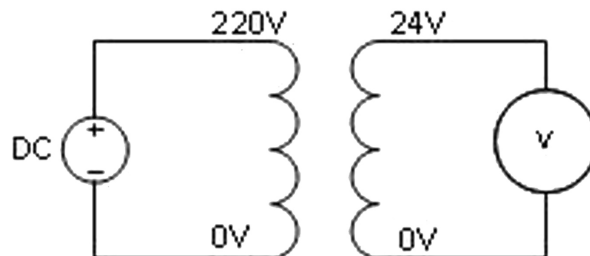


Figura 17: Polaridade por impulso indutivo

Concluiu-se, através deste método que a polaridade dos enrolamentos é subtrativa.

Polaridade por tensão alternada

Este método consiste em ligar o transformador de acordo com a figura 18, medir a tensão aplicada pela fonte e medir a tensão nos terminais indicados pelo voltímetro. Caso o valor lido pelo voltímetro seja superior ao valor da fonte a polaridade é aditiva, caso contrário a polaridade é subtrativa.

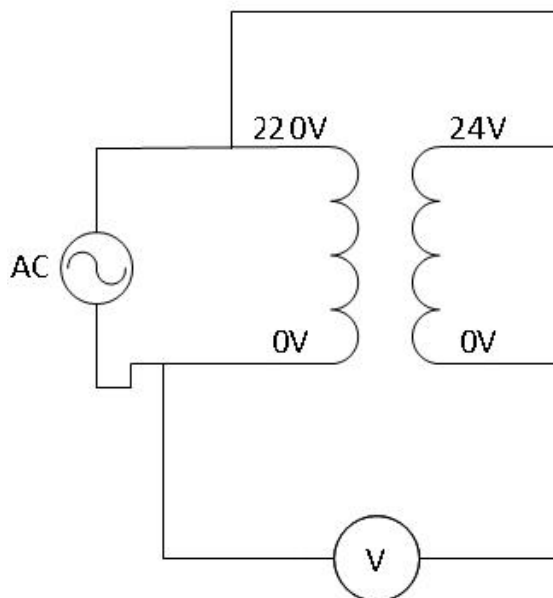


Figura 18: Polaridade por tensão alternada

Os valores obtidos estão na tabela 12.

Tabela 12: Valores obtidos no método de polaridade por tensão alternada

Fonte V_{AC}	Voltímetro V_{AC}
4.89	3.60
9.09	6.71
13.35	9.80
15.45	11.35

Neste método confirma-se a polaridade subtrativa dos enrolamentos.

C. Resistência dos enrolamentos

Ohmímetro

A determinação de resistência através do ohmímetro é feita diretamente pelo instrumento.

Neste método foram utilizados dois multímetros, na função de ohmímetro, para despiste de erros. Os modelos utilizados foram o *Wavetek Meterman 27XT*[5](Ohmímetro 1) e *UNI-T UT201*[6](Ohmímetro 2). Ambos os ohmímetros têm uma resolução de 0.1Ω à escala de interesse e 1% de precisão para o modelo da *Wavetek* e 1.2% para o modelo da *UNI-T*.

Os valores lidos nos instrumentos de medida estão na tabela 13.

Tabela 13: Valores de resistência medidos diretamente pelo ohmímetro

Primário			Secundário		
Ensaio	Ohmímetro 1(Ω)	Ohmímetro 2(Ω)	Ensaio	Ohmímetro 1(Ω)	Ohmímetro 2(Ω)
1	19.5	19.5	1	0.4	0.7
2	19.4	19.6	2	0.6	0.6
3	19.4	19.5	3	0.5	0.6
4	19.4	19.4	4	0.7	0.5
5	19.5	19.5	5	0.6	0.6
Média	19.4	19.5	Média	0.6	0.6

Voltímetro-Amperímetro

O método Voltímetro-Amperímetro serve-se da lei de ohm para o cálculo da resistência, em que $R = \frac{V}{I}$

Para este método montou-se o esquema da figura 19, ligando-se os terminais + e - aos terminais dos enrolamentos cuja resistência se pretende calcular, registrando-se os valores de tensão e corrente em 3 ensaios para cada resistência a calcular. Os valores estão na tabela 14(primário) e 15(secundário) .

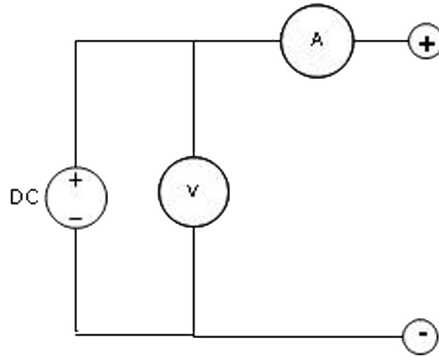


Figura 19: Medição da resistência dos enrolamentos pelo método Voltímetro-Amperímetro

Tabela 14: Cálculo da resistência do primário pela lei de ohm

Ensaio	$V_{DC}(V)$	$I_{DC}(A)$	$R = \frac{V}{I}(\Omega)$
1	3.00	0.14	21.43
2	7.00	0.33	21.21
3	10.00	0.48	20.83
4	11.50	0.55	20.91
5	13.02	0.62	21.00
Média			21.08

Tabela 15: Cálculo da resistência do secundário pela lei de ohm

Ensaio	$V_{DC}(V)$	$I_{DC}(A)$	$R = \frac{V}{I}(\Omega)$
1	0.72	0.71	1.01
2	1.02	1.00	1.02
3	1.44	1.52	0.95
4	1.59	1.64	0.97
5	2.10	2.17	0.97
Média			0.98

D. Valores dos ensaios do transformador em vazio e em curto-circuito

Ensaio em vazio

Tabela 16: Valores obtidos no ensaio do transformador em vazio

$V_1(V)$	$V_2(V)$	$I_1(A)$	$P_0(W)$	$\cos(\varphi)$	$Q(var)$	$S(VA)$
220.90	25.30	0.055	3.0	0.25	11.7	12.1
200.50	22.90	0.040	2.5	0.30	7.6	8.0
180.70	20.60	0.029	2.0	0.38	4.8	5.2
160.30	18.30	0.022	1.6	—	3.0	3.4
139.50	15.90	0.016	1.2	—	1.9	2.3
120.20	13.60	0.013	1.0	—	1.2	1.6
100.90	11.30	0.011	0.7	—	0.8	1.1
79.00	8.80	0.009	0.5	—	0.5	0.7
60.80	6.80	0.007	0.3	—	0.3	0.4
39.60	4.30	0.006	0.1	—	0.2	0.2
20.50	2.10	0.004	0.0	—	0.1	0.1

Ensaio em curto circuito

Tabela 17: Valores obtidos no ensaio do transformador em curto-circuito

$V_1(V)$	$I_1(A)$	$I_2(A)$	$P_0(W)$	$\cos(\varphi)$	$Q(var)$	$S(VA)$
4.00	0.077	0.675	0.3	—	0.0	0.0
8.10	0.158	1.399	1.3	—	0.2	1.3
11.60	0.225	1.990	2.6	—	0.4	2.6
14.80	0.237	2.560	4.2	1.00	0.6	4.2
16.70	0.325	2.910	5.4	0.99	0.8	5.4
19.00	0.367	3.290	6.9	0.99	1.0	7.0
21.30	0.409	3.670	8.7	0.99	1.2	8.7
22.70	0.432	3.880	9.7	0.99	1.4	9.8
23.50	0.442	3.970	10.3	0.99	1.4	10.3
24.10	0.449	4.030	10.7	0.99	1.5	10.8
24.70	0.458	4.110	11.3	0.99	1.5	11.4

E. Ensaio do motor em vazio

Tabela 18: Ensaio em vazio para $2p = 4$

$U_{0s}(V)$	$I_s(A)$	$P_0(W)$	$n(rpm)$
233.7	0.553	81.0	1499
219.4	0.509	71.5	1496
209.0	0.479	65.0	1496
199.6	0.452	59.4	1495
189.5	0.426	54.0	1495
179.5	0.401	49.0	1496
167.8	0.373	43.3	1495
159.5	0.353	39.5	1495
148.9	0.329	35.2	1495
138.6	0.306	31.1	1495
129.2	0.285	27.8	1495
118.4	0.262	24.3	1493
99.2	0.223	18.5	1492
88.8	0.202	15.7	1492
69.5	0.164	11.2	1487
60.2	0.146	9.3	1482
50.6	0.128	7.6	1477
41.0	0.111	6.1	1465
30.3	0.094	4.9	1432
21.0	0.088	4.1	1330
15.3	0.108	4.1	943.5
11.1	0.109	2.9	198.0

Tabela 19: Ensaio em vazio para $2p = 2$

$U_{0s}(V)$	$I_s(A)$	$P_0(W)$	$n(rpm)$
231.4	0.433	86.3	2989
219.0	0.389	77.1	2988
209.9	0.359	70.4	2987
199.7	0.332	64.8	2988
189.3	0.307	69.4	2983
179.6	0.285	55.1	2984
169.3	0.266	50.7	2983
161.1	0.250	47.3	2980
149.2	0.232	43.0	2979
140.2	0.218	39.6	2978
128.8	0.203	36.2	2974
119.8	0.192	33.5	2971
109.3	0.180	31.0	2966
100.6	0.171	28.7	2956
89.7	0.160	26.1	2946
80.2	0.155	24.0	2937
72.3	0.150	22.3	2923
60.5	0.149	20.7	2880
49.6	0.157	19.5	2804
38.7	0.184	18.9	2624
30.6	0.262	22.3	2324