



CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICA

PROJETO DE EXECUÇÃO DE UM GERADOR TRIFÁSICO EM CONFIGURAÇÃO DO ROTOR EM ARRANJO HALBACH

William Gigo

Trabalho executado com recursos da Faculdade de Talentos Humanos- FACTHUS

Aluno de Mestrado do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rio de Janeiro, RJ,
wgigo@facthus.edu.br

Orientadores: Prof. Dr. João Paulo Sinnecker, sinnecker@cbpf.br

Prof. Dr. Romeu Abrahão Pereira, pereiraromeu@yahoo.com

Rio de Janeiro – fevereiro de 2019

G461p

Gigo, William

Projeto de execução de um gerador trifásico em configuração do rotor em arranjo Halbach/ William Gigo.- Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2019.

115 f. Il. col.

Orientadores: Profs. Drs. João Paulo Sinnecker e Romeu Abrahão Pereira.

Dissertação (Mestrado Profissional em Física com Ênfase em Instrumentação Científica) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2019.

1. Instrumentação científica. 2. Geradores elétricos. 3. Rotores. 4. Halbach. I. Título.

CDD 621.313



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Rua Doutor Xavier Sigaud, 150, Rio de Janeiro, Brasil
Tel.: +55 21 2141-7100 Fax.: +55 21 2141-7400 - CEP:22290-180
<http://www.cbpf.br>

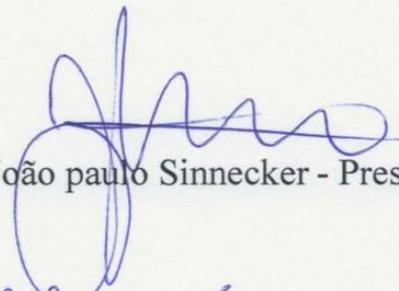
MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**



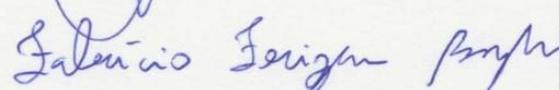
“PROJETO DE EXECUÇÃO DE UM GERADOR TRIFÁSICO EM CONFIGURAÇÕES DO ROTOR EM ARRANJO HALBACH

WILLIAM GIGO

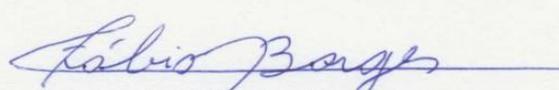
Dissertação de Mestrado apresentada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações fazendo parte da banca examinadora os seguintes professores:



João paulo Sinnecker - Presidente/CBPF



Fabrício Frizera Borghi



Fabio de Oliveira Borges

Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2019.

Agradecimentos

Após um período longo de dedicação à um sonho, agradecer a tanta gente que contribuiu de maneira simples para este objetivo é um fato importante. Inicialmente ao Nosso Senhor que me deu saúde, à minha esposa Gina Mara Stival Gigo que com companheirismo e amor entendeu a importância da realização deste sonho. A minha família que compreendeu à minha ausência em tantos momentos, em especial à minha filha Suzanna Gigo que me auxiliou na minha falta de tempo. Ao Dr. Romeu Abrahão Pereira por seus ensinamentos e presença constante na montagem do projeto. Ao Dr. João Paulo Sinnecker por sua disponibilidade e dedicação. Enfim, um sonho não se realiza sozinho, mas o apoio de família e amigos é fundamental para concretizá-lo. Muito obrigado a todos.

RESUMO

O interesse na produção de energias alternativas a partir de fontes renováveis é um tema muito atual. O Brasil ocupa o oitavo lugar em consumo de energia eólica, com a utilização de geradores de indução trifásicos. Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa entre dois geradores elétricos trifásicos, um com uma bobina estatora e o outro com duas bobinas estatoras, ambos construídos com dois rotores de ímãs permanentes de NdFeB montados em configuração Halbach. Foram realizadas medidas de geração de energia em cargas puramente resistivas usando sistemas em estrela (Y) e em triângulo (Δ) foram determinadas suas potências trifásicas, em função da rotação. Foram determinados os resultados de eficiência, apontando o melhor rendimento. Observou-se que, no sistema com um único estator, as potências trifásicas obtidas atingiram valores mais elevados em relação ao gerador com dois estatores. Por outro lado, os geradores com dois estatores apresentaram maiores rendimentos, já levando em consideração as potências trifásicas, perdas por efeito Joule e correntes parasitas. Ainda foram realizadas simulações utilizando o software Comsol Multiphysics para a verificação dos campos magnéticos obtidos através da utilização de um ou dois estatores nas configurações tradicionais Norte-Sul e no arranjo Halbach. As medidas de campos obtidos foram comparadas com as determinadas experimentalmente, nas mesmas distâncias do estator em relação aos rotores. Ainda se simulou a utilização de ímãs de ferrita em comparação ao dos de Neodímio nos arranjos Halbach. A tendência atual é desenvolver tecnologias visando elevar o grau de eficiência dos geradores com indução trifásica, com a redução da dispersão magnética que ocasiona a perda de tensão e a diminuição dos custos.

Palavra Chave: Gerador, energia, Halbach, rotores, Comsol.

Abstract

The interest in the production of alternative energies from renewable sources is a very current theme. Brazil occupies the eighth place in the consumption of wind energy, with the use of three-phase induction generators. In this work a comparative analysis was performed between two three-phase electric generators, one with a stator coil and the other with two stator coils, both built with two permanent NdFeB magnet rotors mounted in Halbach configuration. Measures were taken to generate energy in purely resistive loads using star (Y) and triangle (Δ) systems. Its three-phase powers were determined as a function of rotation. The efficiency results were determined, indicating the best yield. It was observed that in the system with a single stator, the three-phase powers obtained reached higher values when compared to the generator with two stators. On the other hand, the generators with two stators presented higher yields, taking into account the three-phase powers, losses by Joule effect and parasitic currents. Simulations were carried out using Comsol Multiphysics software to verify the magnetic fields obtained using one or two stators in the traditional North-South configurations and in the Halbach arrangement. The obtained field measurements were compared with those determined experimentally at the same distances from the stator to the rotors. The use of ferrite magnets was simulated in comparison to the Neodymium magnets in the Halbach arrangements. The current trend is to develop technologies aimed at raising the efficiency of three-phase induction generators, reducing the magnetic dispersion that causes the loss of voltage and reducing costs.

Keywords: Generator, energy, Halbach, rotors, Comsol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- FLUXO DE MAGNETIZAÇÃO.....	2
Figura 2- Arranjo de quatro ímãs por comprimento de onda	3
Figura 3– (a) componente radial, (b) componente axial, (c) arranjo Halbach.....	4
Figura 4 – Linhas de Campo de um arranjo Halbach.	4
Figura 5 – Rotor com arranjo Halbach.	5
Figura 6 – Estrutura do rotor com arranjo Halbach.....	8
Figura 7 - Raio interno e externo do rotor com arranjo Halbach	9
Figura 8 – Circunferência interna e externa do rotor com arranjo Halbach	10
Figura 9 – Posicionamento dos ímãs de Neodímio.....	11
Figura 10 – Rotor finalizado com a indicação dos sentidos dos campos magnéticos	12
Figura 11 – Rotor com os ímãs fixados com os parafusos	13
Figura 12 – Bobina e suas dimensões	13
Figura 13 – Altura da bobina	14
Figura 14 – Estator com bobinas trapezoidais.....	15
Figura 15 – Estrutura dos dois Estatores.....	16
<i>Figura 16 – Estrutura dos dois Estatores com numeração das bobinas.....</i>	<i>17</i>
Figura 17 – Enrolamento das bobinas dos Estatores	18
Figura 18 – Montagem do Gerador	24
Figura 19 – Distância entre os Rotores e os Estatores.....	25
Figura 20 – Bancada Didática de controle de Rotação do Rotor	26
Figura 21 - Terminais de acesso as associações das bobinas do Estator	27
Figura 22 – Simulação das linhas de indução magnética gerado por um ímã de Neodímio.....	31
Figura 23 - Resultado de simulação do arranjo Halbach realizada com método de elementos finitos no software COMSOL.	32
Figura 24 - Aproximação da simulação do arranjo Halbach	32
Figura 25 - Simulação do arranjo Halbach identificando o sentido dos campos magnéticos entre ímãs.....	33
Figura 26 – Posicionamento do Rotor na montagem com dois Estatores.	33
Figura 27 – Posicionamento do Rotor na montagem com um Estator.....	33
Figura 28 - Resultado de simulação do arranjo Halbach realizada com um estator no software COMSOL.....	34
Figura 29 - Resultado de simulação utilizando um e dois estatores no arranjo Halbach utilizando o software Comsol	35
Figura 30 - Simulação do arranjo normal realizada com um estator no software COMSOL.	36
Figura 31 - Simulação do campo magnético na região um estator no arranjo Halbach e Norte-Sul utilizando o software COMSOL.	37
Figura 32 – Linhas de intensidade de campo magnético na superfície de ímãs (a) de ferrita e (b) neodímio em simulação no software Comsol	37
Figura 33 – Curva comparativas das intensidades de campo magnético na superfície de ímãs de ferrita e neodímio em simulação no software Comsol.	38
Figura 34 – Curva comparativas das densidades de campo magnético na posição das bobinas com 1 estator e 2 rotores utilizando ímãs de ferrita e neodímio em simulação no software Comsol.....	40
Figura 35 - Terminais de acesso as associações das bobinas de cada Estator	41
Figura 36 – As 3 Tensões do Estator 1, Sistema em Y, em Função da Rotação	43

Figura 37– As 3 Tensões do Estator 2, Sistema em Y, em Função da Rotação	43
Figura 38 – As 3 Tensões do Estator 1, Sistema em Δ , em Função da Rotação.....	44
Figura 39 – As 3 Tensões do Estator 2, Sistema em Δ , em Função da Rotação.....	45
Figura 40 – As 3 Tensões dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação	46
Figura 41 – As 3 Correntes dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação	46
Figura 42 – As 3 Tensões dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Rotação	46
Figura 43 – As 3 Correntes dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Rotação	47
Figura 44 – Perdas Joule, por Fase e por Estator, Sistema em Y, em Função da Rotação	49
Figura 45 – Perdas Joule, por Fase e por Estator, Sistema em Δ , em Função da Rotação ...	49
Figura 46 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação.....	54
Figura 47 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação- Linearizada	54
Figura 48 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Velocidade de Rotação	56
Figura 49 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Velocidade de Rotação - Linearizada	56
Figura 50 – Rendimento do Estator 1, Sistema em Y, em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2	58
Figura 51 – Rendimento do Estator 2, Sistema em Y, em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2	58
Figura 52 – Rendimento do Estator 1, Sistema em Δ , em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2	59
Figura 53 – Rendimento do Estator 2, Sistema em Δ , em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2	59
Figura 54 – As 3 Tensões do Estator, Sistema em Y, em Função da Rotação.....	60
Figura 55 – As 3 Tensões do Estator, Sistema em Δ , em Função da Rotação	61
Figura 56 – As 3 Tensões e Correntes do Estator, Sistema em Y, em Função da Rotação	62
Figura 57 – As 3 Tensões e Correntes do Estator, Sistema em Δ , em Função da Rotação ...	62
Figura 58 – Perdas Joule, por Fase Sistema em Y e Δ , em Função da Rotação	65
Figura 59 – Rendimento do Estator, Sistema em Y e Δ , em Função da Rotação	68
Figura 60 – Rendimento do Estator, Sistema em Y e Δ , em Função da Rotação	68
Figura 61 – Esquema Chave Compensadora	73
Figura 62 – Montagem do painel de partida com chave compensadora – De Lorenzo	73
Figura 63 – Dados de placa do motor – WEG	74
Figura 64 – Contado entre o Termopar e o Motor	74
Figura 65 – Circuito MAX6675	75
Figura 66 – Esquema de ligação do circuito MAX6675	75
Figura 67– Esquema de ligação	76
Figura 68 – Interligação MAX6675 - arduino	76
Figura 69 – Painel no Labview	78
Figura 70 – Leitura do Infravermelho	79
Figura 71 – Gráfico de Temperatura do Labview	79
Figura 72 – Leitura do Infravermelho	80
Figura 73 – Gráfico de Temperatura do Labview	80
Figura 74 – Leitura do Infravermelho	80
Figura 75 – Gráfico de Temperatura do Labview	81
Figura 76 - <i>Campo magnético de uma corrente I na espira de raio R em um ponto no seu eixo.....</i>	83

Figura 77 - Bobina de Helmholtz formada por duas espiras separadas por uma distância d e percorrida por uma corrente I	83
Figura 78 - Gráfico do campo magnético das espiras de Helmholtz apresentando valor máximo na região central entre as espiras.	84
Figura 79 - Arranjo das bobinas, com as suas seções transversais e eixo comum Z	86
Figura 80 - Módulo enrolador de bobinas.....	87
Figura 81 - Suporte das bobinas.	89
Figura 82 - Fonte de tensão conectada ao equipamento.	90
Figura 83 - Testes e medições das bobinas.	90
Figura 84 - Dados obtidos para 7 cm.	93
Figura 85 - Modelagem das Bobinas de Helmholtz.	94
Figura 86 - Densidade de fluxo magnético entre as duas bobinas - simulação em 3D.....	94
Figura 87 - Visão 2D da densidade de fluxo magnético entre as bobinas.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Diâmetro Médio Interno de cada Fase por Estator	20
Tabela 2 – Diâmetro Médio Externo de cada Fase por Estator	20
Tabela 3 – Diâmetro $D_{2/3}$ de cada Fase por Estator	21
Tabela 4 – Resistência Média de cada Fase do Estator 1	21
Tabela 5 – Resistência Média de cada Fase do Estator 2	21
Tabela 6 – Comprimento do fio de cada Fase por Estator	22
Tabela 7 – Número de Espiras de cada Fase por Estator	23
Tabela 8 – Diâmetro Médio Interno de cada Fase para Estator	28
Tabela 9 – Diâmetro Médio Externo de cada Fase para Estator	28
Tabela 10 – Diâmetro $D_{2/3}$ de cada Fase para o Estator.....	28
Tabela 11 – Número de Espiras de cada Fase por Estator	28
Tabela 12 – Resistência Média de cada Fase do Estator	29
Tabela 13 – Comprimento do fio de cada Fase por Estator	29
Tabela 14 – Perdas EDDY por Fase para o Estator 1	48
Tabela 15 – Perdas EDDY por Fase para o Estator 2	48
Tabela 16 – Área de indução por Fase para o Estator 1.....	51
Tabela 17 – Área de indução por Fase para o Estator 2.....	51
Tabela 18 – Indutância por Fase para o Estator 1	51
Tabela 19 – Indutância por Fase para o Estator 2	51
Tabela 20 – Rendimento do Estator 1 Com Sistema em Estrela (Y)	53
Tabela 21 – Rendimento do Estator 2 Com Sistema em Estrela (Y)	53
Tabela 22 – Rendimento do Estator 1 Com Sistema em Triângulo (Δ)	55
Tabela 23 – Rendimento do Estator 2 Com Sistema em Triângulo (Δ)	55
Tabela 24 – Rendimento do Estatores em Função da ligação e do Rotor 1.....	57
Tabela 25 – Rendimento do Estatores em Função da ligação e do Rotor 2.....	57
Tabela 26 – Perdas EDDY por Fase para o Estator	63
Tabela 27 – Perdas por efeito Joule por Fase para o Estator em Y	63
Tabela 28 – Perdas por efeito Joule por Fase para o Estator em Δ	64
Tabela 29 – Área de indução por Fase para o Estator	66
Tabela 30 – Indutância por Fase para o Estator	66
Tabela 31 – Potências Trifásicas para o Estator ligados em Y, em função da rotação	67
Tabela 32 – Potências Trifásicas para o Estator ligados em Δ , em função da rotação	67
Tabela 33 – Média da Temperaturas	81
Tabela 34 - Densidade de fluxo magnético para 7 cm.	92

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
3.1. Medição de Temperatura do Estator	6
3.2. Projeto da bobina de Helmholtz	7
3.3. Projeto do Gerador.....	7
3.3.1. Dimensionamento do Rotor	7
3.3.2. Dimensionamento das Bobinas	13
3.3.3. Determinação Experimental dos Parâmetros das Bobinas de cada Estator 17	
3.3.3.1. Determinação da Média dos Diâmetros por Fase por Estator	17
3.3.3.2. Determinação do Diâmetros $D_{2/3}$ por Fase por Estator	20
3.3.3.3. Determinação do comprimento do fio por Fase por Estator	21
3.3.3.4. Determinação do Número de Espiras (N) por Fase por Estator	22
3.3.4. Montagem do Gerador com 2 Estatores	23
3.3.5. Montagem do Gerador com 1 Estator.	26
4. ELEMENTOS FINITOS	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1. Determinação das Tensões à vazio sem carga em função da rotação com dois Rotores	41
5.2. Determinação das Tensões e Correntes com carga em função da rotação utilizando-se os dois Rotores	45
5.3. Determinação das Perdas em função da rotação utilizando os dois Rotores	47
5.3.1 Perdas EDDY	47
5.3.2 Perdas Joule	48
5.4. Determinação da Potência do Gerador	50
5.5. Determinação do Rendimento.....	53
5.5.1. Determinação dos Rendimentos utilizando os dois Rotores	53
5.5.2. Determinação dos Rendimentos utilizando um Rotor	56
5.6. Determinação das Tensões à vazio em função da rotação com dois Rotores e um Estator	59
6. CONCLUSÕES	68
7. REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE 1.....	73
A1. Projeto do Termômetro eletrônico com sensor	73
1.1.METODOLOGIA	73
1.2.RESULTADO	79

APÊNDICE 2.....	82
2. Projeto da bobina de Helmholtz	82
2.1. INTRODUÇÃO	82
2.2. SISTEMA DE BOBINAS HELMHOLOLTZ.....	82
2.3. PARÂMETROS DE PROJETO E ARRANJO EXPERIMENTAL	85
2.4. CONSTRUÇÃO E EXECUÇÃO DO PROJETO.....	87
2.5. FUNCIONAMENTO E TESTES DO EQUIPAMENTO	89
2.6. SIMULAÇÃO NO PROGRAMA COMSOL	93
8. ANEXOS.....	96

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos o mercado tem buscado cada vez mais máquinas elétricas compactas e com maior rendimento, a engenharia tem foco na indústria de motores de ímãs permanentes, pelo fato de conseguirem manter um fluxo magnético por tempo elevado [FLORES1998]. Assim muitas pesquisas têm avançado na fabricação de motores síncronos de ímãs permanentes devido ao aumento da densidade de potência, maior eficiência e excelente desempenho acústico quando comparado a motores de indução que apresentam melhor desempenho dinâmico e maior torque [SANTOS2015].

Os motores de indução apresentam desvantagens em relação aos motores de ímãs permanentes, como o fato da corrente de magnetização necessária e das perdas ôhmicas no rotor que reduzem a eficiência na faixa de corrente nominal. Eles possuem alta eficiência para uma estreita faixa de velocidades, enquanto os motores de ímãs permanentes apresentam uma alta eficiência para uma maior faixa [SANTOS2015].

Além disso, os motores de ímãs permanentes podem ser empregados em qualquer aplicação que utilize motores de indução. A sua construção é mais simples, são menores, e por não possuírem interruptores mecânicos, seu tempo de vida é maior, evitando uma manutenção permanente [SANTOS2015].

Os ímãs são extraídos da natureza e por isso são limitados, assim seu custo é elevado, tornando alto o preço da máquina [LUCIANO1997]. No entanto, os ímãs como NdFeB apresentam alto desempenho e são capazes de fornecer campos suficientemente fortes [IBTISSAM2014].

O fenômeno de ter um fluxo em frente de uma estrutura de ímãs foi originalmente descrito por John C. Mallisson em 1973. Ele investigou os efeitos de ter um corpo cuboide com uma magnetização no material que estava girando continuamente de um lado para o outro. Mais tarde, em 1981, esse fenômeno foi realizado com ímãs individuais de Klaus Halbach, cujo nome é usado para descrever as estruturas [MANSSON2015].

Klaus Halbach montou um arranjo, utilizando ímãs permanentes montados um ao lado do outro, que faz com que o campo em um dos lados seja minimizado enquanto do outro o campo possui uma forma senoidal [HALBACH1980]. Esse

arranjo gera um campo magnético periódico e o circuito indutivo que interage com esse campo magnético geram forças [RUWER2015].

O arranjo Halbach consistia de um modelo com múltiplos polos chamado “*Halbach Array*”. Seu diferencial estava no alto fluxo produzido por uma das faces, enquanto a face oposta apresentava baixo ou fluxo nenhum, esse fato permitiu que o arranjo fosse utilizado para o efeito de blindagem magnética. Inicialmente o modelo foi empregado para aceleradores de partículas, mas posteriormente seu potencial, sendo reconhecido, foi aplicado em máquinas elétricas [HALBACH1980].

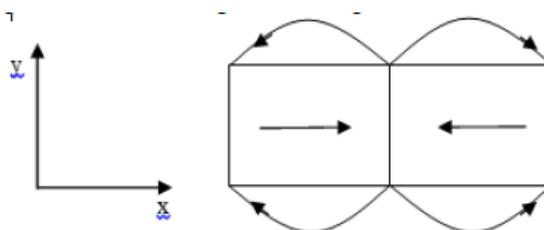
As principais vantagens do arranjo do ímã Halbach são: campo fundamental mais forte em comparação com os arranjos convencionais de PM (ímãs permanentes); elementos de aço de apoio pesado que podem ser omitidos e portanto, não ocorrem perdas de ferro; a densidade do fluxo magnético é mais senoidal e por fim, são campos muito fracos do lado de trás [WINTER2014].

Os arranjos de ímãs Halbach, foram utilizados inicialmente em um modelo de estrutura plana, como uma gravação de fitas [WINTER2014]. A concentração de fluxo ocorria em um lado da amostra, sua primeira aplicação ocorreu em uma disposição multipolar e onduladores para anéis de armazenamento sincrotron. Atualmente esse arranjos são aplicados em atuadores planares para a nanolitografia utilizada na indústria de secadores [WINTER2014].

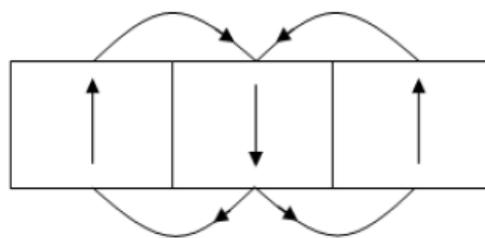
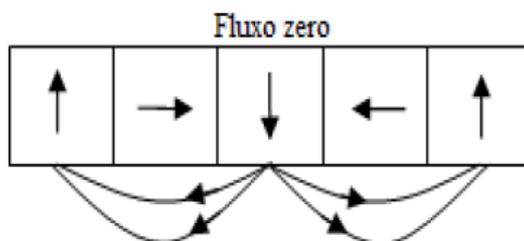
A fundamentação física teórica para o arranjo foi apresentada por John Mallison, mostrando a existência do padrão de uma nova classe de magnetização existente na estrutura planar. A sua propriedade de que todo o fluxo magnético emana de uma superfície, com nenhum fluxo deixando o outro lado da mesma, como mostrado na figura 1 [MALLISON1973].

Em (a) com fluxo de magnetização longitudinal, em (b) com fluxo transversal e, em (c) o fluxo combinado dos dois anteriores [MALLISON1973].

Figura 1- FLUXO DE MAGNETIZAÇÃO



(a) $M_x = \sin Kx$

(b) $M_y = \cos Kx$ 

(c)

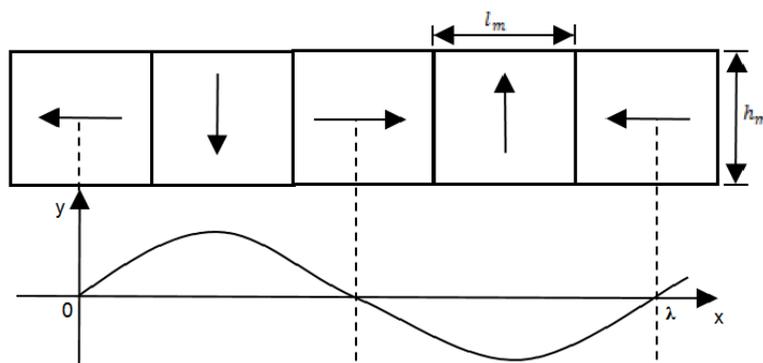
Fonte: [MALLISON1973]

A descrição do padrão de magnetização segundo Mallison, resulta da superposição de M_x e M_y :

$$M_x = \widehat{M} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \text{ e } M_y = \widehat{M} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (01)$$

Sendo: λ o comprimento de onda com número de ímãs igual a quatro, \widehat{M} a amplitude de magnetização como mostrado na figura 2.

Figura 2- Arranjo de quatro ímãs por comprimento de onda



Fonte: [MALLISON1973]

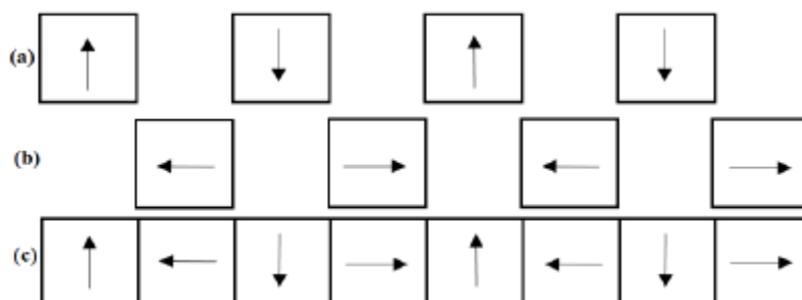
Onde:

 h_M à altura do ímã; l_m o seu comprimento.

A aplicação da auto blindagem magnética apresentada por Mallison foi utilizada por Klaus Halbach em 1980 e, posteriormente em 1984, foi apresentada a

nova configuração de ímãs permanentes, que consisti do arranjo Halbach, como ilustrado na figura 3. Os componentes de arranjo radial (a) e axial (b), com quatro ímãs cada, que juntos se superpõem resultando a distribuição de fluxo magnético de arranjo Halbach de oito ímãs (c).

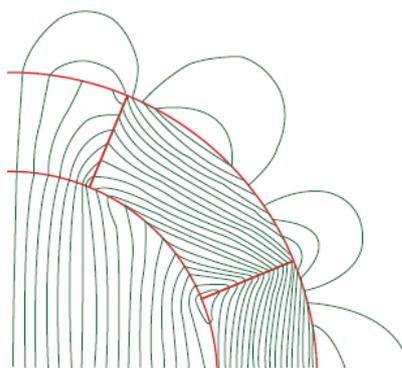
Figura 3– (a) componente radial, (b) componente axial, (c) arranjo Halbach.



Fonte: [MALLISON1973]

A montagem dos rotores baseado no modelo Halbach utiliza ímãs trapezoidais cujo arranjo especial de ímãs permanentes aumenta o campo magnético em um lado da matriz, ao cancelar o campo para perto de zero no outro lado, como pode ser observado na figura 4 [IBTISSAM2014].

Figura 4 – Linhas de Campo de um arranjo Halbach.



Fonte: [MERRITT1994]

A utilização de ímãs com formato trapezoidais tem como consequência estabelecer um fluxo magnético por todo o estator da máquina. Porém o valor destes ímãs encarece o seu uso, o objetivo desta dissertação é mostrar que o uso de ímãs cúbicos, mesmo no arranjo Halbach, produziram os mesmos efeitos e o rendimento dos geradores serão elevados com a diminuição do custo de produção.

2. OBJETIVOS

O objetivo dessa dissertação é demonstrar que a utilização de ímãs de neodímio cúbicos em arranjo Halbach gera correntes e tensões com altos rendimentos em cargas trifásicas podendo substituir os ímãs trapezoidais.

Na figura 5 observa-se que os espaços entre os ímãs foram preenchidos por parafusos que ajudam a fixar os ímãs à estrutura do rotor.

Estabeleceu-se uma distância mínima entre o rotor e o estator de 6,5 mm.

Figura 5 – Rotor com arranjo Halbach.



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A elaboração do projeto exigiu uma organização das estruturas a serem construídas, tanto na confecção do gerador, quanto nos equipamentos que alimentariam o torque ao rotor, e ainda na medição de tensões e correntes de cargas trifásicas, bem como a temperatura do estator e os campos magnéticos dos ímãs.

Inicialmente foram criados equipamentos de medição de temperatura, utilizando arduino.

Em seguida se desenvolveu um sensor de campo magnéticos com bobina de Helmholtz para a comparação e calibração de equipamentos.

Estando os equipamentos calibrados o gerador foi montado primeiramente pelo rotor e depois estator. A rotação do rotor foi estabelecida por um motor, didático, trifásico acoplado a um painel de controle de rotação.

3.1. Medição de Temperatura do Estator

Para determinar a temperatura do gerador trifásico foi utilizado termopares. Os termopares são sensores simples e de baixo custo, amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura. Um termopar é constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade formam um circuito fechado. O termopar desta maneira gera uma Força Eletro-Motriz (FEM), que é proporcional a temperatura [Salcas2016].

Segundo Salcas, 2016, o termopar tipo K é de uso genérico e cobre temperaturas entre -200 e 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Para a integração entre o computador e o termopar foi utilizado um módulo de Arduino. Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseado em hardware e software easy-to-use [Arduino2016].

Para a interpretação dos dados foi empregado o software Labview, um ambiente de desenvolvimento criado especificamente para acelerar a produtividade de quem o utiliza. [Labview2016].

O funcionamento e a descrição do aparelho para medir a temperatura consta no Apêndice 1.

3.2. Projeto da bobina de Helmholtz

A caracterização magnética dos ímãs exigiu a calibração de um gaussímetro.

Para tanto, foram construídas duas Bobinas de Helmholtz, estas bobinas geram um campo magnético constante que foi comparado com a medida pelo gaussímetro modelo HT20 Tesla Meter na função de densidade de fluxo magnético.

As duas bobinas de confecção circulares idênticas separadas por uma distância exatamente igual ao seu raio. Cada bobina contém um número N de espiras e estão ligadas de modo que a corrente flua através de ambas no mesmo sentido, essa configuração foi idealizada há mais de um século pelo físico alemão Hermann von Helmholtz é denominada Bobinas de Helmholtz. Segundo Halliday, Resnick e Walker, 2012, este enrolamento resulta em um campo magnético extremamente uniforme na região central entre as bobinas.

No projeto foram apresentadas as equações resultantes para definir os parâmetros e a construção de dois módulos (um enrolador de bobinas e um suporte para estabilizá-las paralelamente). Para obtenção dos valores do campo magnético foi utilizado um sensor de efeito Hall e foi realizada uma simulação no programa *COMSOL Multiphysics* para dar suporte teórico aos testes realizados.

O funcionamento e a descrição do aparelho para medir o campo magnético consta no Apêndice 2.

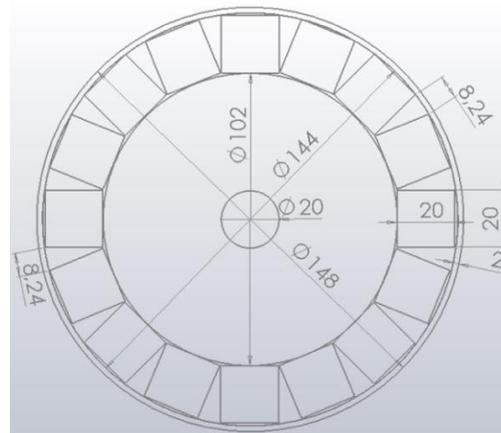
3.3. Projeto do Gerador

3.3.1. Dimensionamento do Rotor

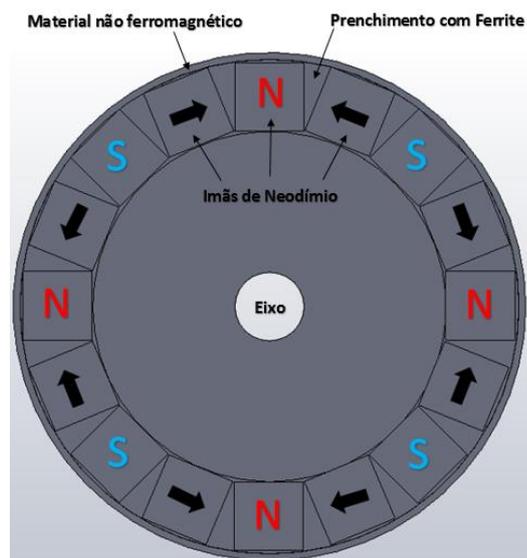
O gerador foi projetado com dois rotores no arranjo Halbach. Cada rotor foi composto por 16 ímãs de NdFeB, grade 35 com densidade de fluxo magnético de 0,4316 T, fornecido pelo fabricante, formato cúbico com dimensões 20x20x20mm.

O rotor com arranjo Halbach foi construído com estrutura mostrada na figura 6, os 16 ímãs foram assentados em discos de alumínio ou material não ferromagnético. Os vazios de ar entre os ímãs que apresentam um formato de cunha foram fixados com parafusos.

Figura 6 – Estrutura do rotor com arranjo Halbach



(a) Medidas do rotor (em mm)



(b) Rotor com arranjo Halbach

Fonte: [Arquivo do autor]

Os ímãs ocupam uma circunferência interna de perímetro l_i igual a

$$l_i = l_{imã} \cdot 16 = 32 \pm 0,1 \text{ cm} \quad (02)$$

onde: $l_{imã}$ o comprimento do ímã. O raio interno do rotor R_i foi de

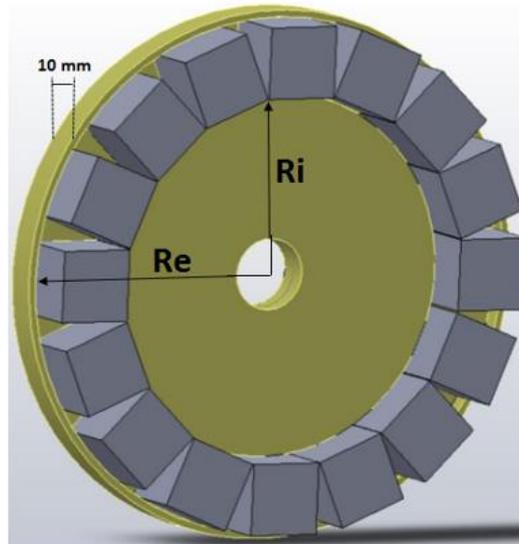
$$R_i = \frac{0,32}{2\pi} = 5,1 \pm 0,1 \text{ cm} \quad (03)$$

e o raio externo R_e do rotor pode ser obtido pela soma do raio interno r_i com o comprimento do ímã $l_{imã}$ mais 1 milímetro em que é

$$R_e = R_i + l_{imã} + 0,001 = 7,2 \pm 0,1 \text{ cm} \quad (04)$$

No rotor, R_i e R_e são raios internos e externos, respectivamente e é mostrado na figura 7.

Figura 7 - Raio interno e externo do rotor com arranjo Halbach



Fonte: [Arquivo do autor]

O perímetro da circunferência externa l_e do rotor com arranjo Halbach foi de

$$l_e = 2\pi \cdot R_e = 45,2 \pm 0,1 \text{ cm} \quad (05)$$

e o comprimento vazio total, l_{vazio} , gerado pelos espaçamentos entre os ímãs foi de

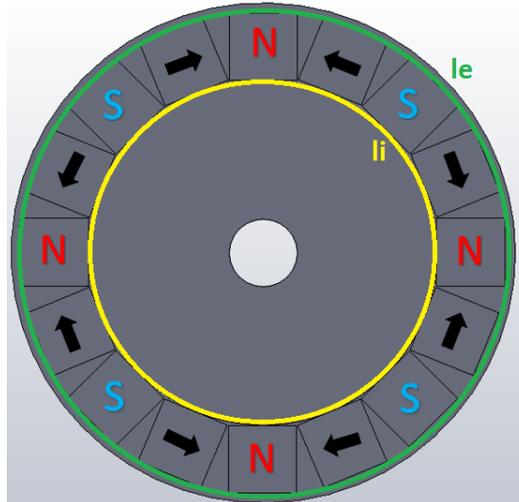
$$l_{vazio} = l_e - l_i = 13,2 \pm 0,1 \text{ cm} \quad (06)$$

Logo, o espaço vazio entre ímãs l_{cunha} é

$$l_{cunha} = \frac{l_{vazio}}{16} = 0,8 \pm 0,1 \text{ cm} \quad (07)$$

Os perímetros da circunferência l_i e l_e são mostradas na figura 08.

Figura 8 – Circunferência interna e externa do rotor com arranjo Halbach



Conhecendo os valores dos raios R_i e R_e é possível calcular K_r , que exprime a razão entre os raios interno e externo e deve situar-se entre 0,57 e 0,63 [MILLER1989, SANTIAGO2010], para a eficiência da máquina seja de aproximadamente 0,95. Porém devido as características físicas dos ímãs empregados no projeto, o valor de K_r foi de

$$K_r = \frac{R_i}{R_e} = 0,71 \pm 0,01 \quad (08)$$

O valor de R_e também pode ser calculado utilizando a equação (09), onde r_e é

$$R_e = \left(\frac{2 \cdot T}{\pi \sigma \cdot (1 - K_r^2) \cdot (1 + K_r)} \right)^{1/3} \quad (09)$$

$$R_e = 5,39 \pm 0,01 \text{ cm}$$

em que o tamanho do ímã deveria ser utilizado no projeto é

$$l_{\text{ímã}} = R_e - R_i = 2,18 \pm 0,01 \text{ cm} \quad (10)$$

Vamos agora considerar uma potência gerada de 1 KW por fase, quando a velocidade de giro for de 600 rpm. E radiano esta velocidade, ω , toma o seguinte valor

$$W = \frac{2\pi \times 600}{60} = 62,83 \pm 0,01 \text{ rad/s} \quad (11)$$

A razão entre a potência gerada P e a velocidade em rad/s dá um valor para o torque de

$$T = \frac{P}{W} = 15,92 \text{ N.m} \quad (12)$$

A tensão de cisalhamento σ deve situar-se no intervalo de 13,75 KPa a 27,5 KPa segundo Miller [MILLER1989] e para efeitos de cálculos, vamos considerar $\sigma = 27,5 \text{ KPa}$.

A figura 9 mostra o início do posicionamento dos ímãs e a figura 10 a montagem final com a indicação do sentido dos campos magnéticos:

Figura 9 – Posicionamento dos ímãs de Neodímio



Figura 10 – Rotor finalizado com a indicação dos sentidos dos campos magnéticos



Fonte: Arquivo do autor

Os ímãs foram fixados com parafusos para evitar a movimentação como mostra a figura 11.

Figura 11 – Rotor com os ímãs fixados com os parafusos



Fonte: [Arquivo do autor]

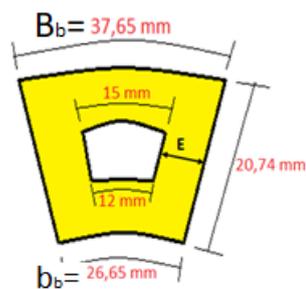
3.3.2. Dimensionamento das Bobinas

O motor foi composto por dois estatores. Adotando $2p=16$, sendo $2p$ o número de pólos, o número de bobinas no estator é: [CARTER1967]

$$N = \frac{3}{4} \cdot 2p = 12 \text{ bobinas} \quad (13)$$

Com dois estatores e três fases na geração, tem-se 8 bobinas por fase. Considerando a espessura da bobina $E=9\text{ mm}$, observado na figura 15, as medidas da bobinas são mostradas na figura 12.

Figura 12 – Bobina e suas dimensões



Fonte: [Arquivo do autor]

O comprimento da base maior da bobina B_b é dado pela razão entre a circunferência externa l_e e o número de bobinas N :

$$B_b = \frac{l_e}{N} = \frac{452}{12} \cong 3,76 \pm 0,01 \text{ cm} \quad (14)$$

e o comprimento da base menor da bobina b_b é a razão entre a circunferência interna e o número de bobinas N :

$$b_b = \frac{l_i}{N} = \frac{320}{12} \cong 2,67 \pm 0,01 \text{ cm} \quad (15)$$

Considerando o comprimento c_1 da bobina o mesmoda altura do imã (20mm) como mostra a figura 13, e utilizando a fórmula de Pitágoras para calcular o comprimento da altura da bobina h , se obtém:

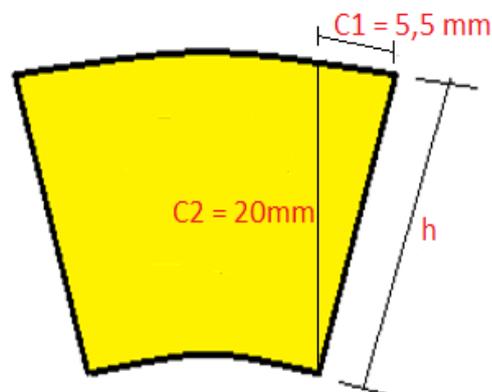
$$c_1 = \frac{(B_b - b_b)}{2} = \frac{(3,76 - 2,67)}{2} \quad (16)$$

$$c_1 = 0,55 \pm 0,01 \text{ cm}$$

Com este valor, a altura h da bobina ficam dada por:

$$h^2 = c_1^2 + c_2^2 = 2,07 \pm 0,01 \text{ cm} \quad (17)$$

Figura 13 – Altura da bobina



Fonte: [Arquivo do autor]

Conhecendo todas as medidas das bobinas é possível calcular a área da bobina A_b que é a área total da bobina A_t menos a área do espaço vazio A_v :

$$A_t = 2,07 \cdot \frac{(3,76 + 2,67)}{2} \quad (18)$$

$$A_t = 6,66 \pm 0,01 \text{ cm}^2$$

e a área do vazio é:

$$A_v = 2,5 \cdot \frac{(15,0 + 12,0)}{2} \quad (19)$$

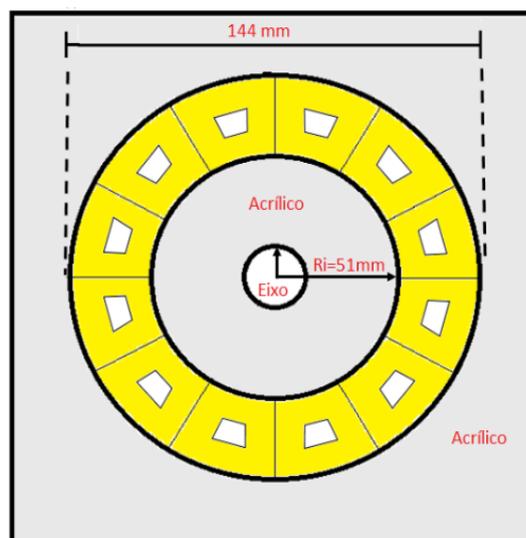
$$A_v = 0,34 \pm 0,01 \text{ cm}^2$$

Logo, a área total da bobina é:

$$A_b = A_t - A_v = 6,33 \pm 0,01 \text{ cm}^2 \quad (20)$$

Conhecendo-se todas as medidas e a área das bobinas, o esquema da estrutura do estator é mostrado na figura 14. A armadura do estator é composta por bobinas trapezoidais envolvidas em resina de grande resistência mecânica.

Figura 14 – Estator com bobinas trapezoidais



Fonte: [Arquivo do autor]

Considerando a tensão por fase $E_{\phi} = 12V$, o campo magnético do ímã $B_m = 0,4316 T$, fornecida pelo fabricante, e a área da bobina $A_b = 6,33 \text{ cm}^2$ o número de espiras por fase N_{ϕ} é:

$$N_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{(A_b \cdot W \cdot B_m)} = 699 \text{ esp./fase}, \quad (21)$$

então o número de espiras por bobina N_b é:

$$N_b = \frac{N_{\phi}}{N} = \frac{699}{8} \cong 88 \text{ esp./bobina} \quad (22)$$

O gerador foi composto por dois estatores, onde cada estator tem 12 bobinas, sendo quatro bobinas para cada fase. As quatro bobinas de um estator (conectadas em série) estão ligadas em série as outras quatro bobinas (conectadas em série) do outro estator, gerando assim 12 volts por fase.

Confeccionamos as bobinas enrolando um fio de cobre esmaltado com 1mm de diâmetro. As bobinas foram montadas formando o estator e cada estator foi fixado em uma placa de acrílico, como mostra a figura 15.

Figura 15 – Estrutura dos dois Estatores



Fonte: [Arquivo do autor]

A resistência de cada bobina foi medida separadamente.

3.3.3. Determinação Experimental dos Parâmetros das Bobinas de cada Estator

3.3.3.1. Determinação da Média dos Diâmetros por Fase por Estator

Para a determinação do diâmetro médio por fase de cada estator mediu-se inicialmente os diâmetros internos e externos de cada bobina, de cada estator, utilizando um paquímetro.

Os Anexos 4 e 5 apresentam tabelas com os valores medidos e médias dos diâmetros internos dos estatores 1 e 2, respectivamente.

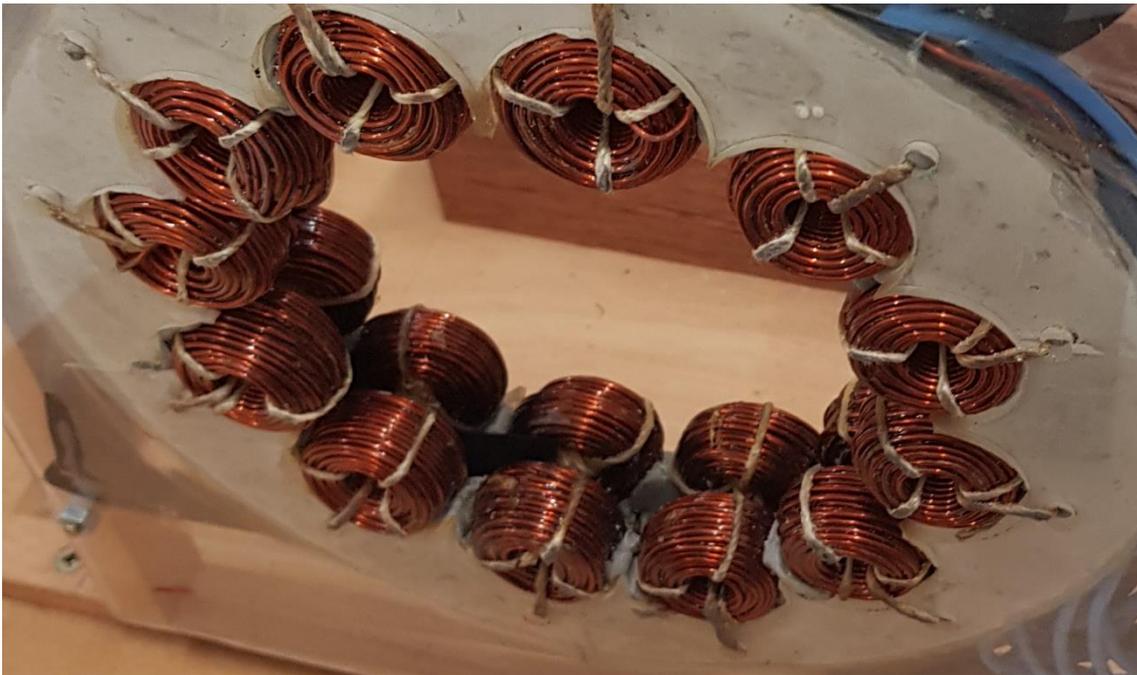
Em cada estator as bobinas foram ligadas em série em grupos de 4 nas seguintes sequencias: Fase 1: 1 – 4 – 7 – 10, Fase 2: 2 – 5 - 8 – 11 e Fase 3: 3 – 6 – 9 – 12.

A numeração de cada bobina, com a respectiva posição estão identificadas na figura 16.

As bobinas foram enroladas pela sobreposição de fios em sequência constante até que foram obtidos a largura adequada, como mostra a figura 17.

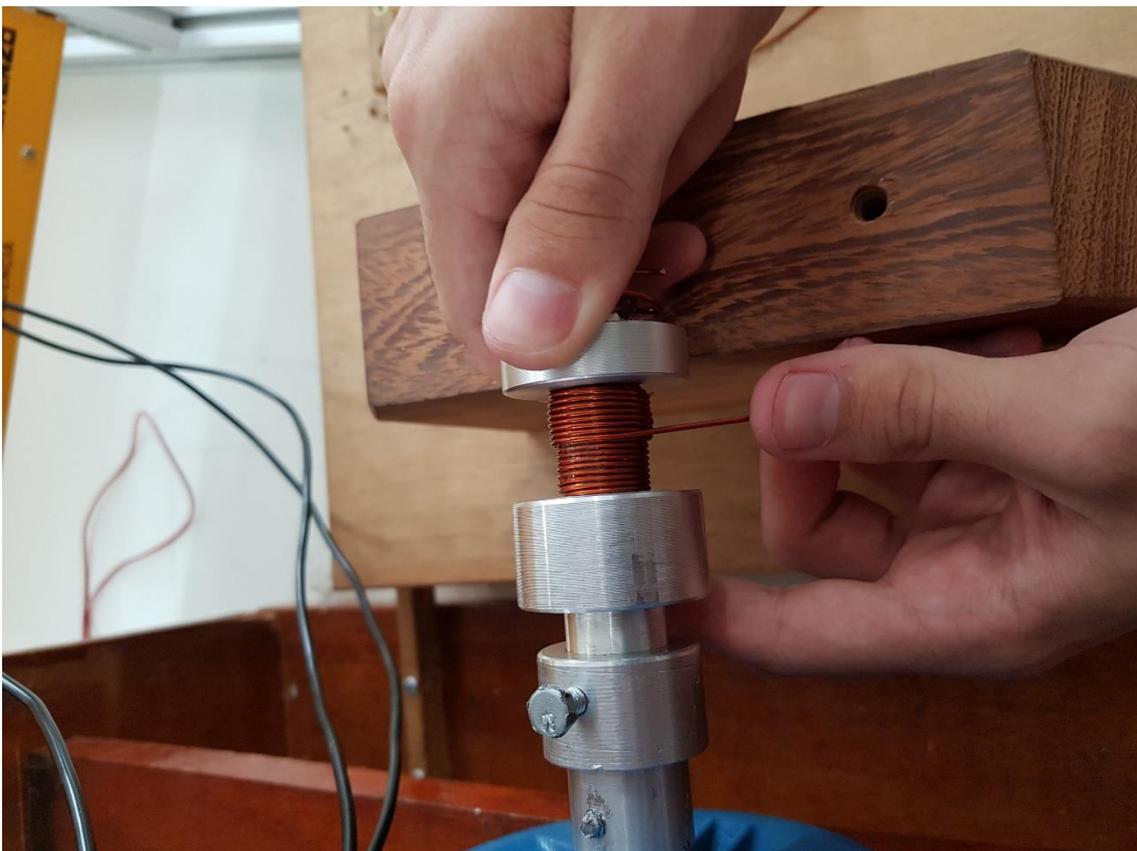
Figura 16 – Estrutura dos dois Estatores com numeração das bobinas





Fonte: [Arquivo do autor]

Figura 17 – Enrolamento das bobinas dos Estatores



Fonte: [Arquivo do autor]

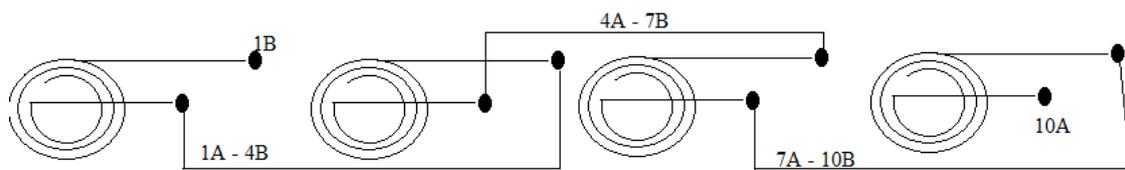
Foram obtidos assim acesso a dois terminais, um interno foi representado sempre pelo número da bobina e a letra A e pelo externo pela letra B.

Em cada uma das fases sempre foram feitas as ligações em série de bobinas a cada 4 bobinas ligadas como mostrado nas sequências a seguir.

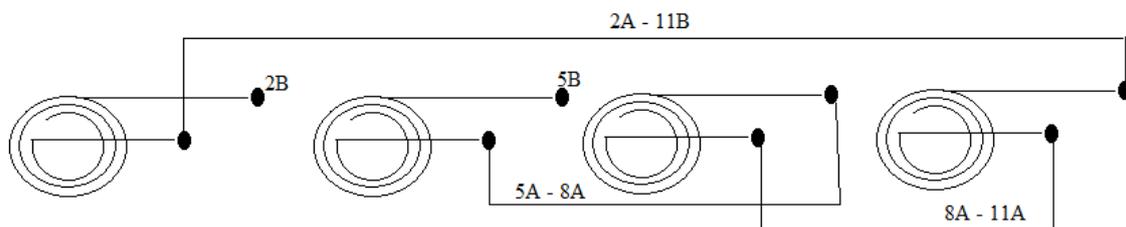
As ligações entre bobinas foram feitas utilizando solda.

ESTATOR 1

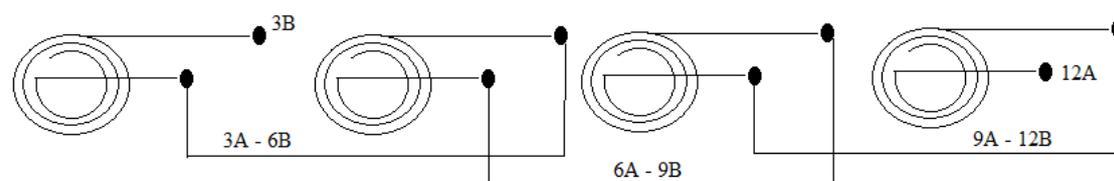
FASE A:



FASE B:

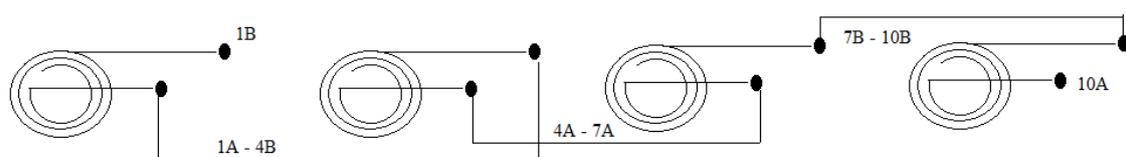


FASE C:

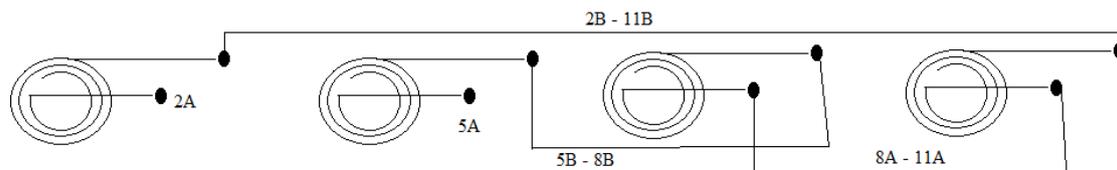


ESTATOR 2

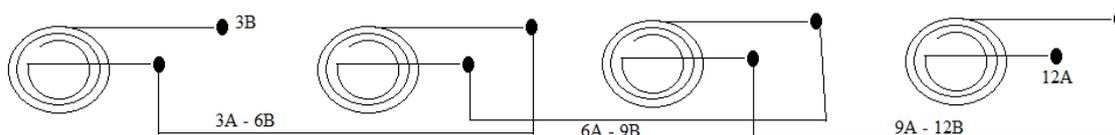
FASE A:



FASE B:



FASE C:



Na tabela 1 apresentamos os diâmetros internos médios por fase:

Tabela 1 – Diâmetro Médio Interno de cada Fase por Estator

	BOBINAS	ESTATOR 1 (mm)	ESTATOR 2 (mm)
FASE 1: $\Phi 1$	1-4-7-10	9,34 $\pm 0,01$	9,49 $\pm 0,01$
FASE 2: $\Phi 2$	2-5-8-11	8,98 $\pm 0,01$	9,43 $\pm 0,01$
FASE 3: $\Phi 3$	3-6-9-12	9,21 $\pm 0,01$	9,40 $\pm 0,01$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

De maneira análoga determinou-se o diâmetro médio externo das bobinas dos estator 1 e 2, como mostra os anexos 6 e 7.

Em consequência da união das bobinas tem-se na tabela 2 o diâmetro médio externo por fase e por estator.

Tabela 2 – Diâmetro Médio Externo de cada Fase por Estator

	BOBINAS	ESTATOR 1 (mm)	ESTATOR 2 (mm)
FASE 1: $\Phi 1$	1-4-7-10	25,70 $\pm 0,01$	26,29 $\pm 0,01$
FASE 2: $\Phi 2$	2-5-8-11	26,21 $\pm 0,01$	25,88 $\pm 0,01$
FASE 3: $\Phi 3$	3-6-9-12	26,45 $\pm 0,01$	26,21 $\pm 0,01$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

3.3.3.2. Determinação do Diâmetros $D_{2/3}$ por Fase por Estator

O diâmetro $D_{2/3}$ permite o cálculo do número médio de espiras por bobina e por estator. Ele pode ser determinado pela equação 23.

$$D_{2/3} = \left(\frac{D_e - D_i}{3} \right) * 2 + D_i \quad (23)$$

Sendo:

$D_{2/3}$: diâmetro $2/3$ médio de cada fase

D_e : diâmetro médio externo por fase

D_i : diâmetro médio interno por fase

Assim determinou-se o $D_{2/3}$ por fase e por estator mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Diâmetro $D_{2/3}$ de cada Fase por Estator

	BOBINAS	ESTATOR 1 (mm)	ESTATOR 2 (mm)
FASE 1: $\Phi 1$	1-4-7-10	20,25 $\pm 0,01$	20,69 $\pm 0,01$
FASE 2: $\Phi 2$	2-5-8-11	20,47 $\pm 0,01$	20,39 $\pm 0,01$
FASE 3: $\Phi 3$	3-6-9-12	20,70 $\pm 0,01$	20,61 $\pm 0,01$

3.3.3.3. Determinação do comprimento do fio por Fase por Estator

Para a determinação do comprimento do fio de cada fase por estator, medimos inicialmente a resistência de cada bobina utilizando um miliOhmímetro. Os anexos 8 e 9 apresentam os valores medidos para cada estator.

As bobinas foram associadas em série 4 a 4 obtendo-se as resistências por fase e por estator, com uma resistência média de cada fase sendo o valor dividido por 4, representado da tabela 4 do Estator 1 e tabela 5 do Estator 2.

Tabela 4 – Resistência Média de cada Fase do Estator 1

ASSOCIAÇÕES SÉRIE DE RESISTÊNCIAS	R/FASE/ESTATOR(mΩ)	MÉDIA (mΩ)
$R_1+R_4+R_7+R_{10}$	515,7 $\pm 0,1$	128,93 $\pm 0,01$
$R_2+R_5+R_8+R_{11}$	521,1 $\pm 0,1$	130,28 $\pm 0,01$
$R_3+R_6+R_9+R_{12}$	510,8 $\pm 0,1$	127,70 $\pm 0,01$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Tabela 5 – Resistência Média de cada Fase do Estator 2

ASSOCIAÇÕES SÉRIE DE RESISTÊNCIAS	R/FASE/ESTATOR(mΩ)	MÉDIA (mΩ)
$R_1+R_4+R_7+R_{10}$	513,3 $\pm 0,1$	128,33 $\pm 0,01$
$R_2+R_5+R_8+R_{11}$	514,5 $\pm 0,1$	128,63 $\pm 0,01$
$R_3+R_6+R_9+R_{12}$	519,5 $\pm 0,1$	129,88 $\pm 0,01$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

As bobinas foram todas enroladas com o mesmo fio de cobre de 18 AWG, correspondente a um diâmetro de 1 mm, sendo assim a Área de seção transversal dele pode ser determinada pela equação abaixo:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (24)$$

Sendo:

A: área de seção transversal do fio

D: diâmetro do fio

Obtém-se assim o valor de área $A = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$.

Como a resistividade do fio de cobre é constante $\rho = 1,71 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, é possível determinar o comprimento do fio, dado pela Lei de Ohm, equação abaixo:

$$l = \frac{R \cdot A}{\rho} \quad (25)$$

Sendo:

l: comprimento do fio

R: resistência do fio/fase

A: área de seção transversal do fio

ρ : resistividade do cobre

Assim obtém-se a tabela 6 com os comprimentos dos fios por fase e por estator.

Tabela 6 – Comprimento do fio de cada Fase por Estator

	BOBINAS	ESTATOR 1 (m)	ESTATOR 2 (m)
FASE 1: $\Phi 1$	1-4-7-10	5,92 \pm 0,01	5,89 \pm 0,01
FASE 2: $\Phi 2$	2-5-8-11	5,98 \pm 0,01	5,90 \pm 0,01
FASE 3: $\Phi 3$	3-6-9-12	5,86 \pm 0,01	5,96 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

3.3.3.4. Determinação do Número de Espiras (N) por Fase por Estator

Na determinação do número de espiras por fase e por Estator utilizou-se a equação abaixo:

$$N = \frac{l}{\pi \cdot D_{2/3}} \quad (26)$$

Sendo:

N: número de Espiras por fase e por Estator

$D_{2/3}$: diâmetro 2/3 médio de cada fase

Determinou-se assim o número de espiras por fase e por estator na tabela 7.

Tabela 7 – Número de Espiras de cada Fase por Estator

	BOBINAS	ESTATOR 1 (espiras)	ESTATOR 2 (espiras)
FASE 1: $\Phi 1$	1-4-7-10	93	91
FASE 2: $\Phi 2$	2-5-8-11	93	92
FASE 3: $\Phi 3$	3-6-9-12	90	92

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

3.3.4. Montagem do Gerador com 2 Estatores

Durante o procedimento de montagem do gerador foi construído um suporte para adaptação dos rotores, estator e motor.

A centragem e o balanceamento do rotor foram realizados com o objetivo de eliminar a trepidação e a oscilação dançante que ocorrem durante o giro do rotor. O rotor centrado e balanceado tem giro leve e proporciona variação uniforme do fluxo magnético no espaço do estator.

O procedimento de balanceamento consiste na fixação de material metálico e não-magnético no espaço livre existente nas cavidades entre os ímãs para homogeneizar a massa.

A figura 18 mostra o resultado da montagem dos rotores e estatores e a conexão do eixo com o motor.

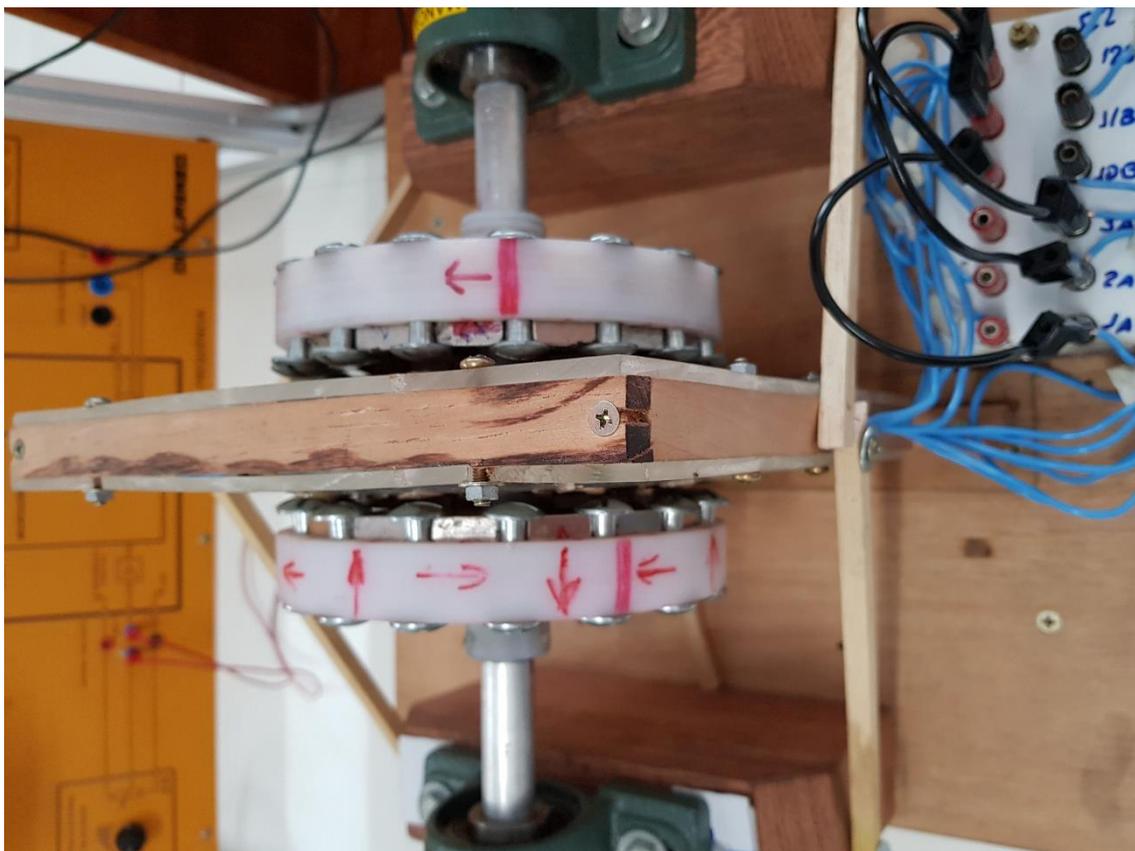
Figura 18 – Montagem do Gerador



Fonte: [Arquivo do autor]

A figura 19 é possível visualizar a posição dos rotores em relação aos estatores, onde o vazio foi o mínimo possível para evitar as perdas magnéticas.

Figura 19 – Distância entre os Rotores e os Estatores



Fonte: [Arquivo do autor]

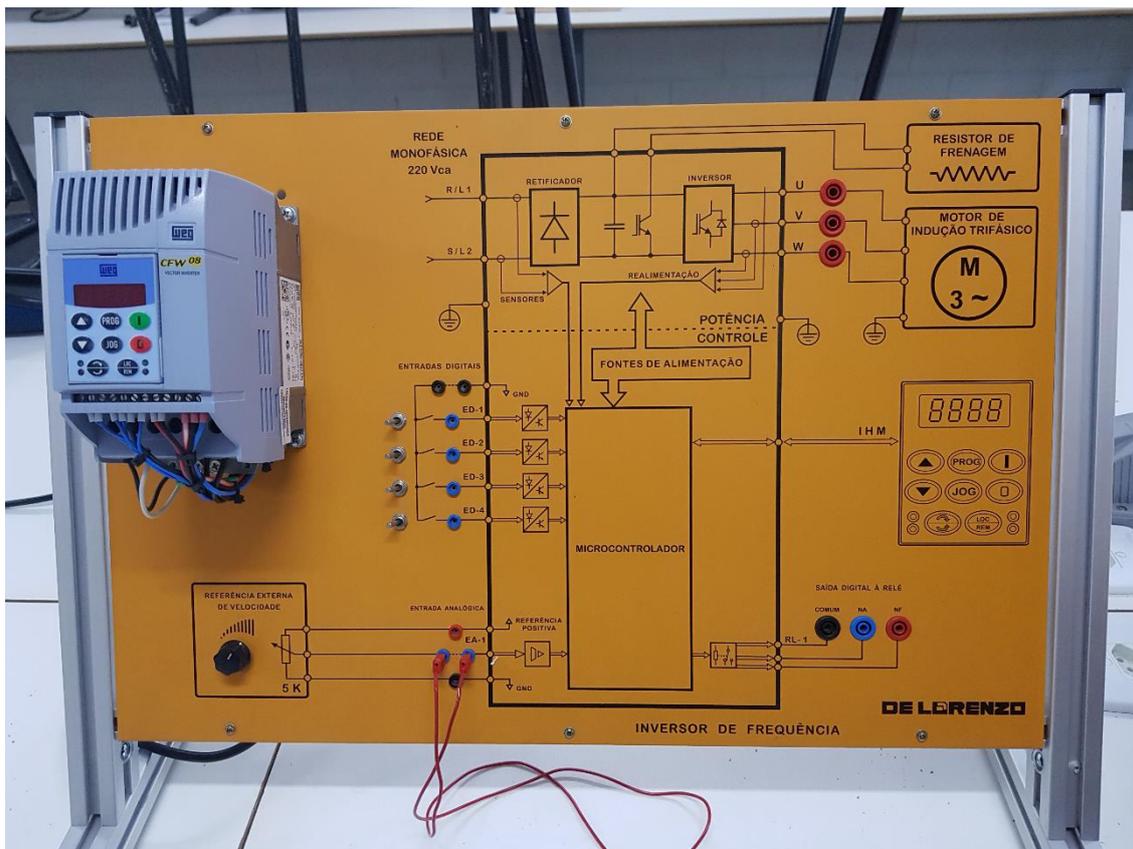
Um eixo foi fixado a cada um dos rotores através de parafusos, tomando sempre o cuidado de observar o efeito magnético. Foram realizadas medidas para a identificação de fuga do campo magnéticos na região de trás do rotor. Durante as medidas não foi encontrado valores significativos.

O motor trifásico de controle do torque no eixo do rotor foi montado em sequência trifásica em estrela e conectado a bancada didática de controle de rotação. Ela apresenta um microprocessador com inversor de frequência da marca De Lorenzo, mostrado na figura 20.

O controle da rotação foi fundamental na avaliação do comportamento de correntes e tensões nas saídas dos estatores do gerador, para controle de potências e monitoramento do rendimento.

A variação gradual da rotação do rotor permite a identificação do ponto de máximo rendimento e os valores de perdas tanto por correntes parasitas como por efeito Joule.

Figura 20 – Bancada Didática de controle de Rotação do Rotor



Fonte: [Arquivo do autor]

Segundo Gieras [GIERAS2004], existe um limite no aumento do torque do motor que pode ser alcançado, aumentando a largura do diâmetro do motor. Fatores que limitam o design do disco único são: a) força axial tomada pelos rolamentos; b) integridade da junta mecânica entre o disco e o eixo; c) rigidez do disco.

O uso de vários discos necessita de sistemas de refrigeração para as conexões. Para minimizar o efeito das perdas pode-se utilizar cabos de seção transversal variável. Os cabos são maiores nas bobinas do que nas conexões de saída dos estatores, porém os valores de custo aumentam muito.

A verificação do rendimento do gerador, será apresentado nos resultados.

3.3.5. Montagem do Gerador com 1 Estator.

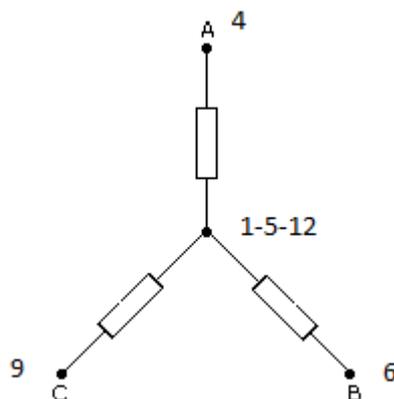
O procedimento para um estator será o mesmo. Foram feitas associações em Estrela (Y) ou em Triângulo (Δ) nos terminais de acesso, como mostra a figura 21.

Figura 21 - Terminais de acesso as associações das bobinas do Estator



Fonte: Arquivo do autor

Para a associação do estator em estrela foram ligados em um ponto comum os terminais 1 – 5 – 12. Assim pode-se medir as tensões entre fases dos terminais 4 – 6 – 9, para o estator como esquematizado a seguir.



Em todas as situações foram determinadas as tensões entre fases em função da rotação do rotor, sendo alternada de 100 a 1200 rpm, em variações de 100 rpm.

Sendo assim tem-se na tabela 8 os seguintes diâmetros internos médios por fase:

Tabela 8 – Diâmetro Médio Interno de cada Fase para Estator

	BOBINAS	ESTATOR [mm]
FASE 1: $\Phi 1$	6-10-11-12	5,0 \pm 0,1
FASE 2: $\Phi 2$	1-2-3-4	5,0 \pm 0,1
FASE 3: $\Phi 3$	5-7-8-9	5,0 \pm 0,1

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

De maneira análoga determinou-se o diâmetro médio externo das bobinas dos estator.

Em consequência da união das bobinas tem-se na tabela 9 o diâmetro médio externo por fase para o estator.

Tabela 9 – Diâmetro Médio Externo de cada Fase para Estator

	BOBINAS	ESTATOR [mm]
FASE 1: $\Phi 1$	6-10-11-12	31,60 \pm 0,01
FASE 2: $\Phi 2$	1-2-3-4	31,60 \pm 0,01
FASE 3: $\Phi 3$	5-7-8-9	31,60 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

O $D_{2/3}$ por fase para o estator é mostrado na tabela 10.

Tabela 10 – Diâmetro $D_{2/3}$ de cada Fase para o Estator

	ESTATOR 1
FASE 1: $\Phi 1$	22,73 \pm 0,01
FASE 2: $\Phi 2$	22,73 \pm 0,01
FASE 3: $\Phi 3$	22,73 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

O número de espiras por fase para o estator está na tabela 11.

Tabela 11 – Número de Espiras de cada Fase por Estator

	ESTATOR	
FASE 1: $\Phi 1$	200	Espiras
FASE 2: $\Phi 2$	199	Espiras
FASE 3: $\Phi 3$	200	Espiras

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Para a determinação do comprimento do fio de cada fase por estator, determinou-se inicialmente a resistência de cada bobina utilizando um miliOhmímetro,

As bobinas foram associadas em série 4 a 4 obtendo-se as resistências por fase no estator, com uma resistência média de cada fase sendo o valor dividido por 4, representado da tabela 12 do Estator.

Tabela 12 – Resistência Média de cada Fase do Estator

ASSOCIAÇÕES SÉRIE DE RESISTÊNCIAS	R/FASE/ESTATOR(mΩ)	MÉDIA (mΩ)
$R_6+R_{10}+R_{11}+R_{12}$	1244,0 ±0,1	311,00 ±0,01
$R_1+R_2+R_3+R_4$	1237,0 ±0,1	309,25 ±0,01
$R_5+R_7+R_8+R_9$	1246,0 ±0,1	311,50 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

As bobinas foram todas enroladas com o mesmo fio de cobre de 18 AWG, correspondente a um diâmetro de 1 mm.

Assim obtém-se a tabela 13 com os comprimentos dos fios por fase do estator.

Tabela 13 – Comprimento do fio de cada Fase por Estator

	ESTATOR
FASE 1: Φ1 (m)	14,28 ±0,01
FASE 2: Φ2 (m)	14,20 ±0,01
FASE 3: Φ3 (m)	14,30 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

4.ELEMENTOS FINITOS

Durante muitos anos, os matemáticos tiveram dificuldade em resolver equações algébricas devido a limitação de recursos. Assim, no final do século XVIII foi desenvolvido o Método dos Elementos Finitos (MEF), mas sua elaboração ocorreu apenas no século XX com a chegada dos computadores, permitindo que equações mais complexas fossem resolvidas. [LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO,E.T.; LANDRE JR., J.2006].

No início o MEF foi empregado em problemas de mecânica e mais tarde para análise de fenômenos físicos[HUGENS2000]. Atualmente, ele tem ajudado na solução de vários tipos de problemas de engenharia, como condução de calor, dinâmica de fluidos, campos elétricos e magnéticos, entre outros [BARKANOV2001].

Em 1960, Ray Clough introduziu pela primeira vez o termo “elemento finito” no artigo “O método dos elementos finitos na análise de tensão plana” [Clough R. W.1960]. Outros autores contribuíram para o desenvolvimento MEF, como Argyris, Turner, Martin, Hrennikov e muitos outros [Argyris1955; Turner Martin1956; Hrennikov1941].

O Método dos Elementos Finitos pode ser definido com uma análise matemática, no qual um meio contínuo é discretizado, ou subdividido em pequenos elementos, os quais terão as mesmas características de quem o originou. As equações diferenciais desenvolvidas pelo modelo descreverão esses elementos, chegando ao resultado almejado [LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO,E.T.; LANDRE JR., J.2006].

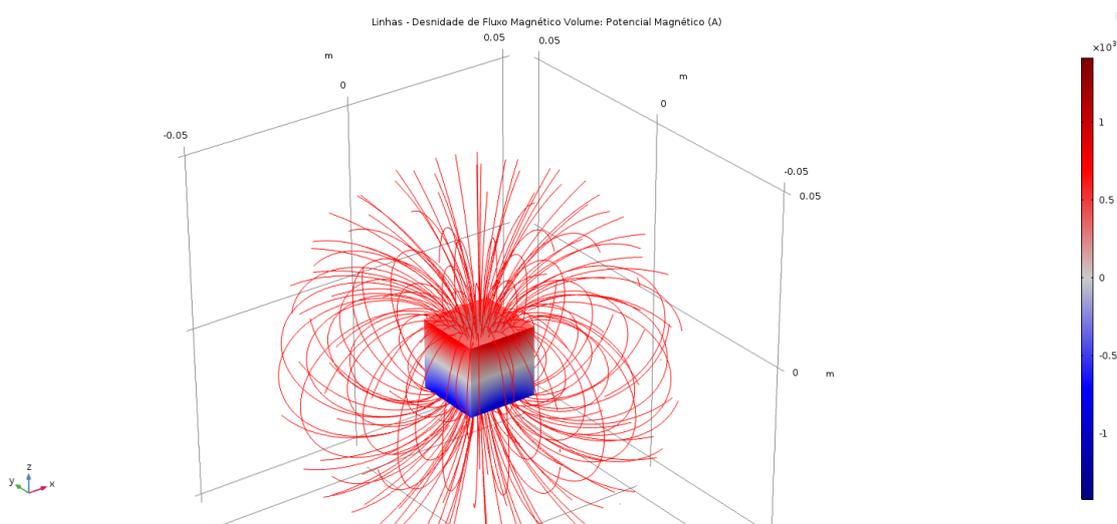
Assim, o MFE foi utilizado pela engenharia para obter soluções de problemas de valor limite, também chamados de problemas de campo. O campo se apresenta na forma de uma estrutura física, e as variáveis de campo são de interesse da equação diferencial[AZEVEDO2003].

O método é muito útil em modelar matematicamente estruturas complexas com geometrias irregulares. No início, elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, posteriormente passaram a ser os quadriláteros e os hexaedros[AZEVEDO2003].

Assim, utilizando esta metodologia, foram feitas análises dos campos de indução magnéticos com o software *COMSOL Multiphysics*. As simulações consideram os rotores em tamanho real.

A princípio foi simulado o campo magnético gerado por apenas um ímã confirmando a direção das linhas de indução como observado na figura 22.

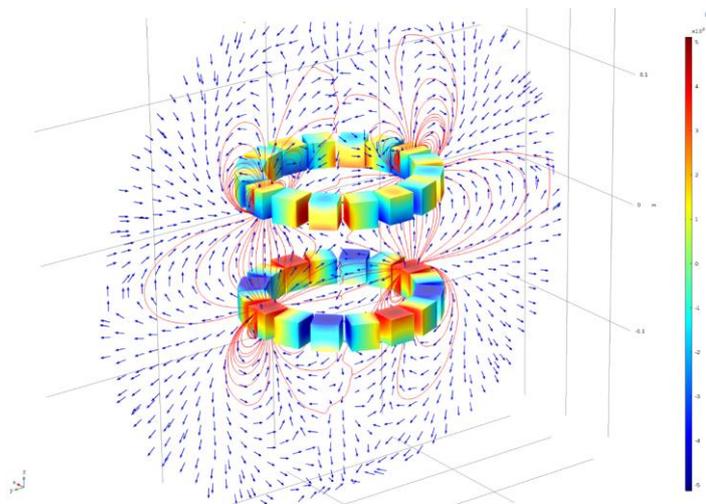
Figura 22 – Simulação das linhas de indução magnética gerado por um ímã de Neodímio



Fonte: [Arquivo do autor]

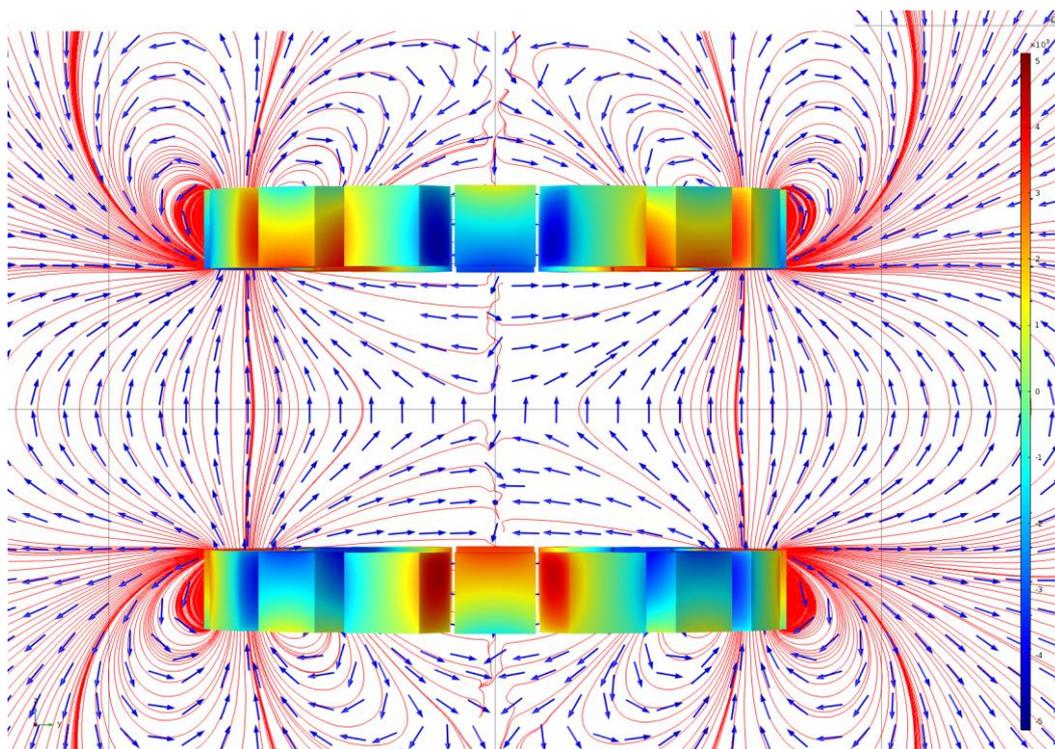
Depois foram simulados a disposição dos 16 ímãs na configuração Halbach, onde são repetidas em grupos de 4 de acordo com a figura 23, e foram identificados através das setas o sentido do campo magnético. A figura 24 há uma visão mais aproximada dos campos gerados com a intensificação das linhas próximas aos ímãs. Nesta simulação, consideramos a remanência de cada ímã no valor fornecido pelo fabricante. Cada ímã é um magneto de NdFeB, grau 35 (N35) com remanência $B_r = 431,6$ mT e formato cúbico com dimensões 20x20x20mm.

Figura 23 - Resultado de simulação do arranjo Halbach realizada com método de elementos finitos no software *COMSOL*.



Fonte: [Arquivo do autor]

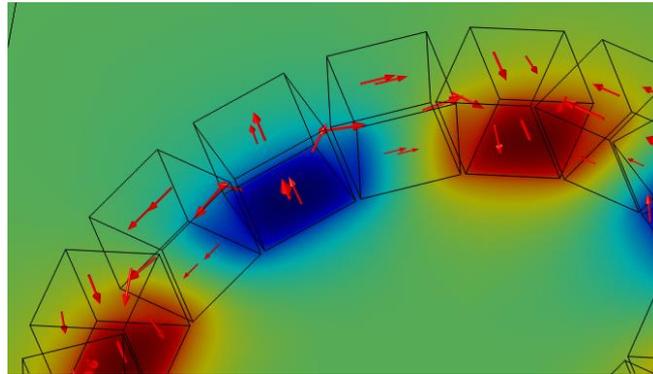
Figura 24 - Aproximação da simulação do arranjo Halbach



Fonte: [Arquivo do autor]

A figura 25 podemos visualizar o sentido dos campos magnéticos entre os ímãs no rotor do gerador.

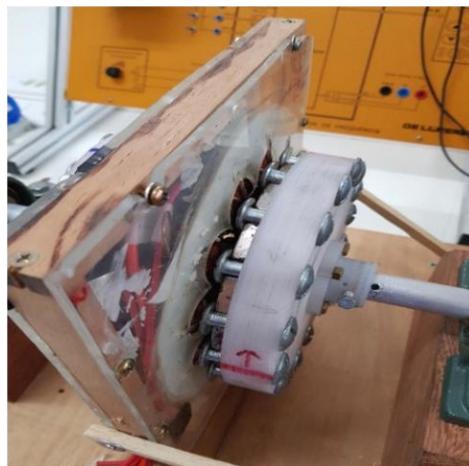
Figura 25 - Simulação do arranjo Halbach identificando o sentido dos campos magnéticos entre ímãs



Fonte: [Arquivo do autor]

A menor distância obtida de vazio entre o rotor e o estator foi de aproximadamente 6,5 mm, como pode ser indicado na figura 26 para dois estatores resultando em 7,1 cm entre rotores.

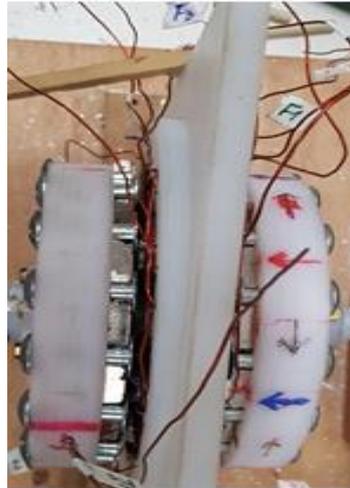
Figura 26 – Posicionamento do Rotor na montagem com dois Estatores.



Fonte: [Arquivo do autor]

Utilizando um estator a distância entre rotores passou para 3,5 cm como mostrado a figura 27.

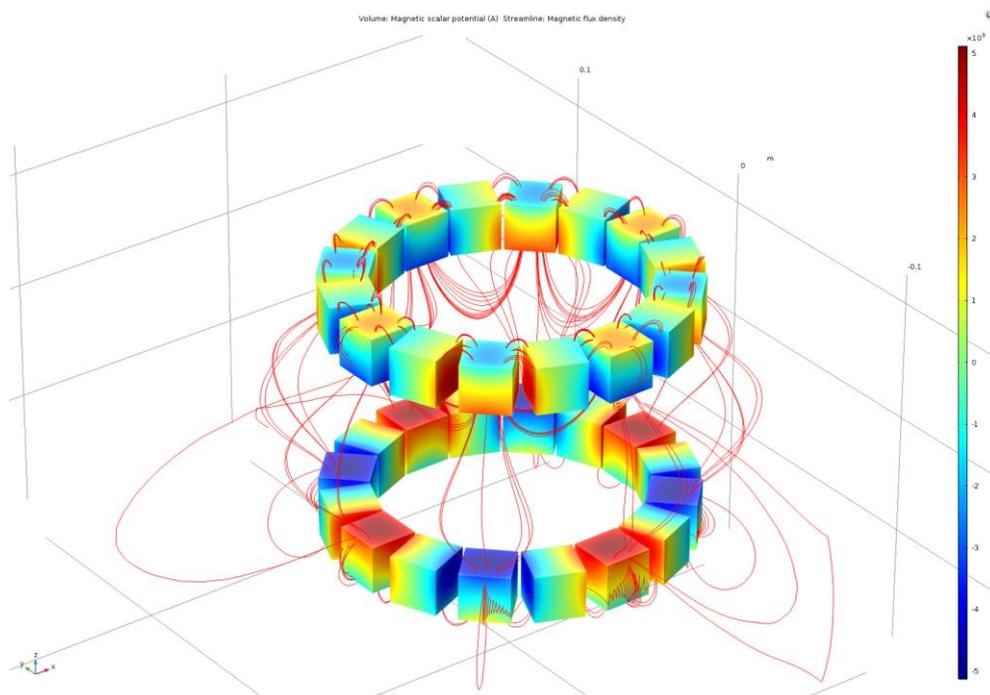
Figura 27 – Posicionamento do Rotor na montagem com um Estator.



Fonte: [Arquivo do autor]

Assim para um estator foi realizado outra simulação no Comsol e os campos magnéticos observados na figura 28. Nesta situação é evidenciado a intensificação do campo magnético entre rotores.

Figura 28 - Resultado de simulação do arranjo Halbach realizada com um estator no software COMSOL



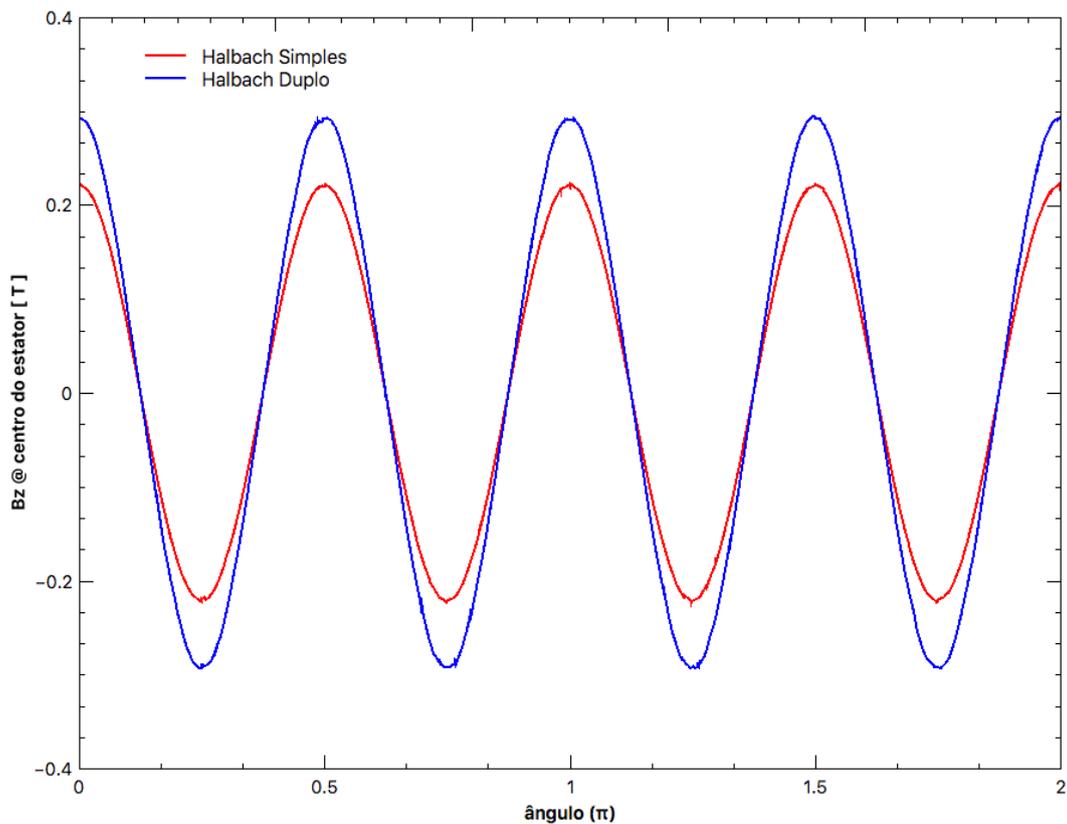
Fonte: [Arquivo do autor]

Na região central foi estabelecido uma linha entre os rotores onde estaria posicionado o(s) estator(es) para a simulação do campo magnético à qual estaria(m)

submetido(s). A figura 29 mostra a intensidade do campo magnético no sentido do eixo z que atravessa a(s) bobina(s) do(s) estator(es).

Apesar da aproximação dos ímãs com 1 estator a intensidade do campo magnético com dois estatores ficou mais intensa por todo o sentido do fluxo magnético.

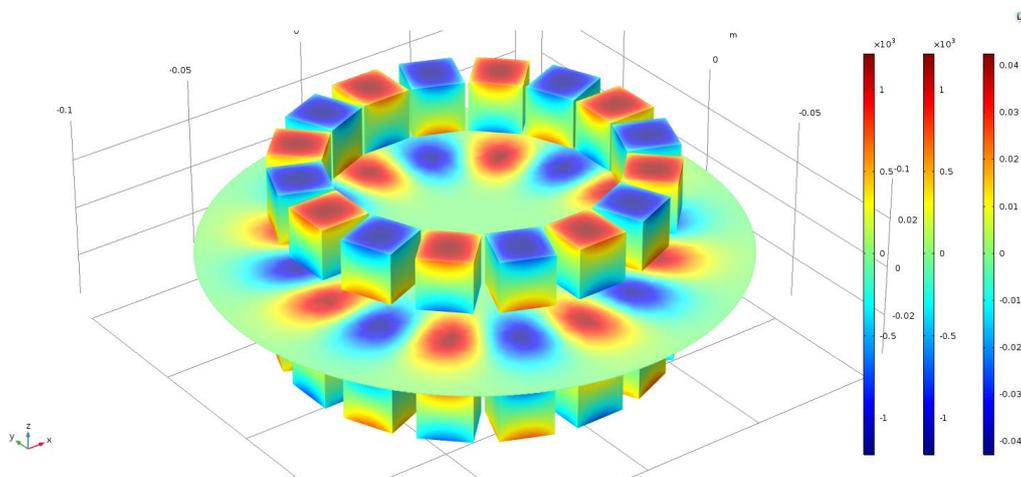
Figura 29 - Resultado de simulação utilizando um e dois estatores no arranjo Halbach utilizando o software Comsol



Fonte: [Arquivo do autor]

O gerador na disposição Halbach também foi comparada com a disposição normal Norte- Sul, isto é, os ímãs serão dispostos em orientação paralela com mostrado na figura 30.

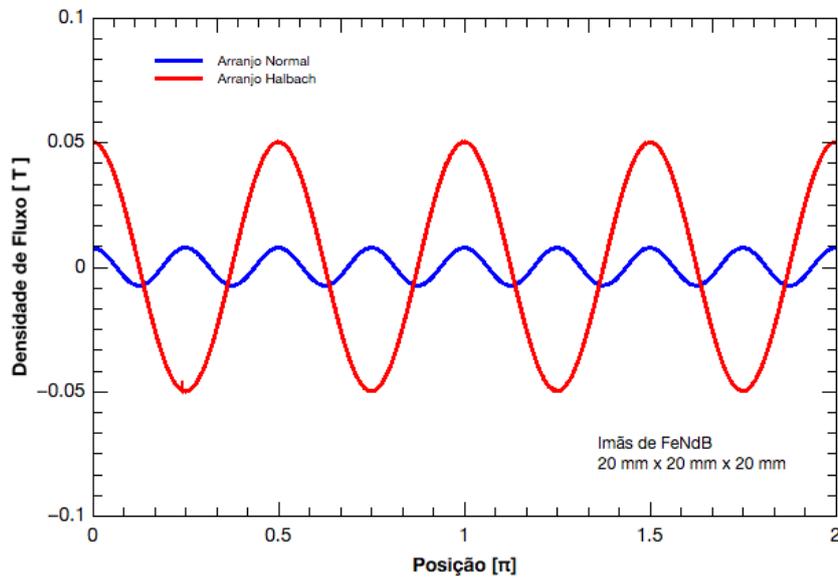
Figura 30 - Simulação do arranjo normal realizada com um estator no software COMSOL.



Fonte: [Arquivo do autor]

Simulando com a mesma linha a posição do estator simples e determinando a intensidade de campo magnético nas bobinas é possível observar na figura 31. A intensidade do campo magnético nesta região é visivelmente superior no arranjo Halbach atingindo valores de até 0,05 T contra apenas 0,01 T no arranjo convencional Norte- Sul.

Figura 31 - Simulação do campo magnético na região um estator no arranjo Halbach e Norte-Sul utilizando o software COMSOL.

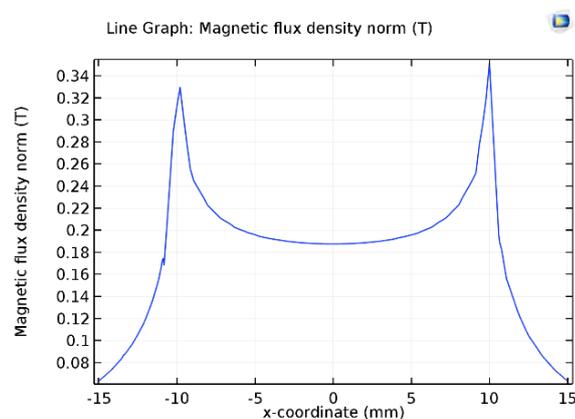


Fonte: [Arquivo do autor]

O custo do ímã de neodímio no mercado é crescente e torna muitas vezes inviável a sua utilização na elaboração de geradores. Assim foi simulado um gerador, na mesma configuração Halbach para uma comparação na utilização de ímãs de Ferrita (FeO).

A figura 32 mostra a intensidade das linhas de campo magnético de um ímã de ferrita (a) em comparação com o ímã de Neodímio (b).

Figura 32 – Linhas de intensidade de campo magnético na superfície de ímãs (a) de ferrita e (b) neodímio em simulação no software Comsol



(a) Ferrita

(b) Neodímio

Fonte: [Arquivo do autor]

Apesar de ter sido utilizado ímãs maiores em volume de ferrita a intensidade o campo magnético gerado na superfície é bem menor que o de neodímio, a figura 33 mostra as duas curvas com as respectivas intensidades de campo gerado.

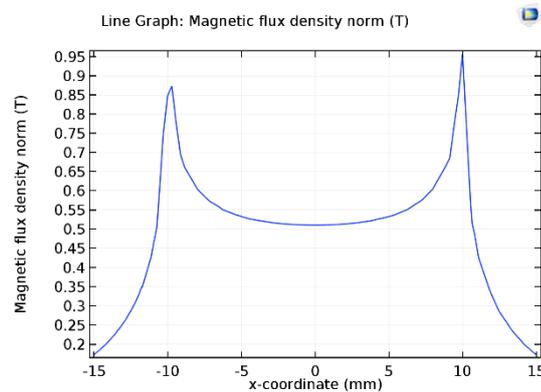
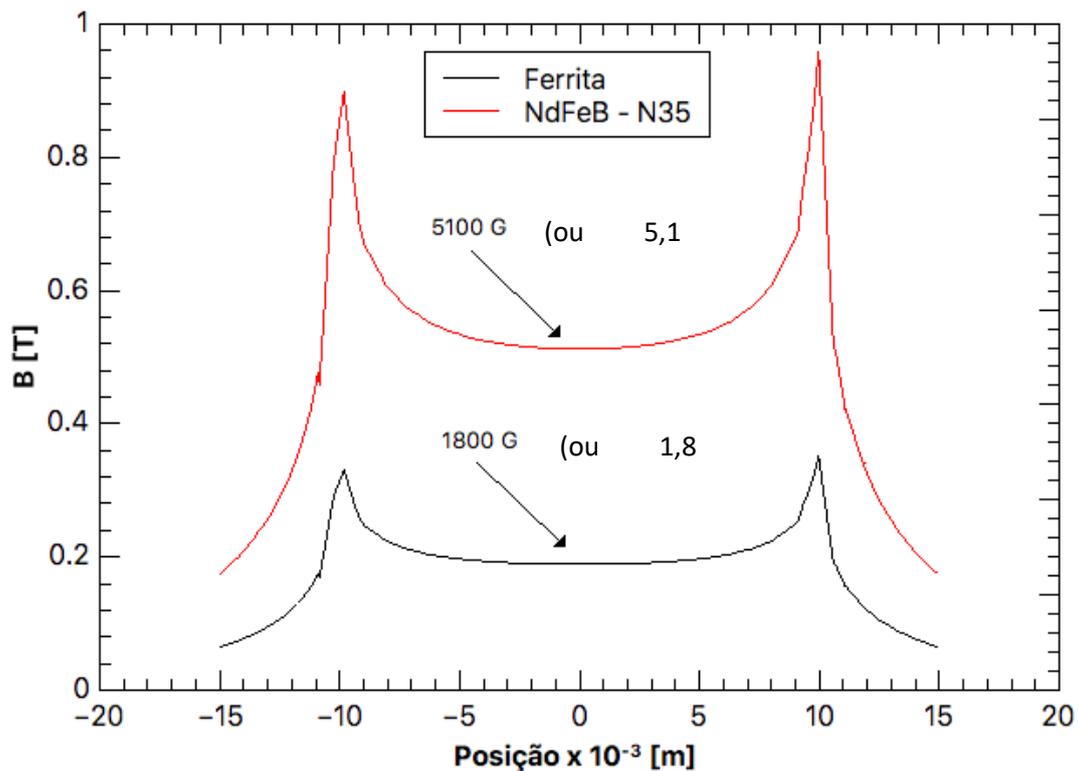


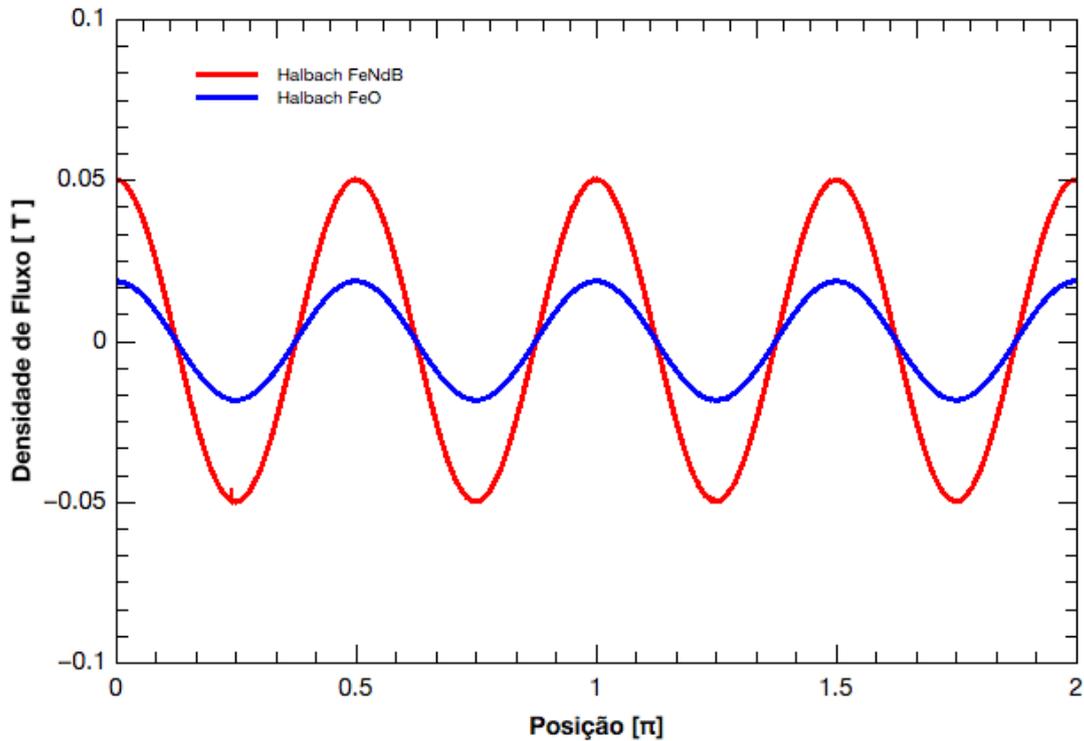
Figura 33 – Curva comparativas das intensidades de campo magnético na superfície de ímãs de ferrita e neodímio em simulação no software Comsol.



Fonte: [Arquivo do autor]

Assim foi simulado no arranjo Halbach, com dois rotores e 1 estator, utilizando ímãs de Neodímio e de ferrita. Traçando-se a mesma linha na posição do estator e determinando-se a intensidade do campo magnético nesta região obteve-se a figura 34.

Figura 34 – Curva comparativas das densidades de campo magnético na posição das bobinas com 1 estator e 2 rotores utilizando ímãs de ferrita e neodímio em simulação no software Comsol



Fonte: [Arquivo do autor]

A intensidade do campo magnético gerado pelo Neodímio é bem superior ao da ferrita assumindo valores de até 50 mT no de neodímio contra aproximadamente 22 mT do outro. Valores de até 127% maiores superam ainda o gasto com geradores a ferrita.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram montados 2 geradores. O primeiro constituído de 2 rotores e 2 estatores que foram ligados em série. Porém a corrente elétrica assumiu valores elevados o que poderia ocasionar a queima dos estatores, portanto as medidas foram realizadas em cada um dos estatores individualmente. O segundo gerador foi montado com 2 rotores e 1 estator.

Para a determinação do rendimento do gerador foram adotadas duas metodologias. Inicialmente obteve-se o rendimento de cada estator submetido ao campo magnético dos dois rotores e, em seguida, determinamos o rendimento de um rotor de cada vez.

A máquina síncrona apresenta velocidade mecânica e frequência com relações praticamente constantes, o que não ocorre no gerador que necessita de conversores de potência [SUNI2009].

Normalmente as perdas rotacionais e adicionais não são perfeitamente determinadas para qualquer condição elétrica ou mecânica de operação de uma máquina, assim são desprezadas quando em velocidades transitórias, apesar de não muito correto, não ficam longe dos valores reais, visto que os rendimentos dos geradores síncronos são próximos de 96% [SUNI2009].

5.1. Determinação das Tensões à vazio sem carga em função da rotação com dois Rotores

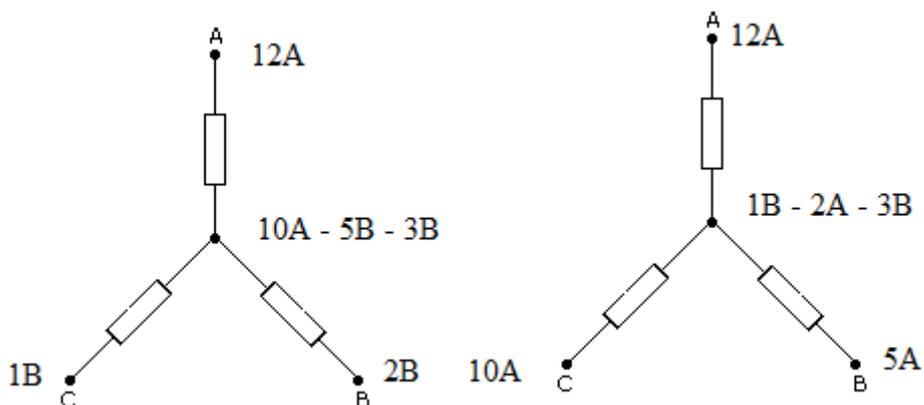
Em cada um dos estatores foram feitas associações em estrela (Y) ou em triângulo (Δ) nos terminais de acesso. Os terminais de acesso são observados na figura 35.

Figura 35 - Terminais de acesso as associações das bobinas de cada Estator



Fonte: [Arquivo do autor]

Para a associação do estator 1 em estrela os terminais 10A – 5B – 3B foram ligados em um ponto comum. Para o estator 2 os terminais 1B – 2A – 3B foram ligados juntos, assim pode-se medir as tensões entre as fases dos terminais 12A – 1B – 2B, para o estator 1 e 12A – 10A – 5A, para o estator 2, como esquematizado a seguir. Com este procedimento, obtemos as tabelas dos anexos 10 e 11.



Em todas as situações foram determinadas as tensões entre fases em função da rotação do rotor. Com uma variação de 100 rpm cobrimos uma faixa de 100 a 1200 rpm.

Associando as três tensões do gerador de cada estator, se observa uma homogeneidade das três tensões, como identificado pelas figuras 36 e 37, dos estatores 1 e 2, respectivamente.

As vezes medimos uma pequena diferença de tensões, como no Figura 36, porém estas variações não são significativas. Geralmente estas alterações de leituras nos equipamentos ocorrem em rotações elevadas e já eram esperadas.

Todas as leituras de tensões foram feitas utilizando um multímetro de bancada da Minipa, modelo MDM – 8045C, como mostrado no Anexo 12.

Figura 36 – As 3 Tensões do Estator 1, Sistema em Y, em Função da Rotação

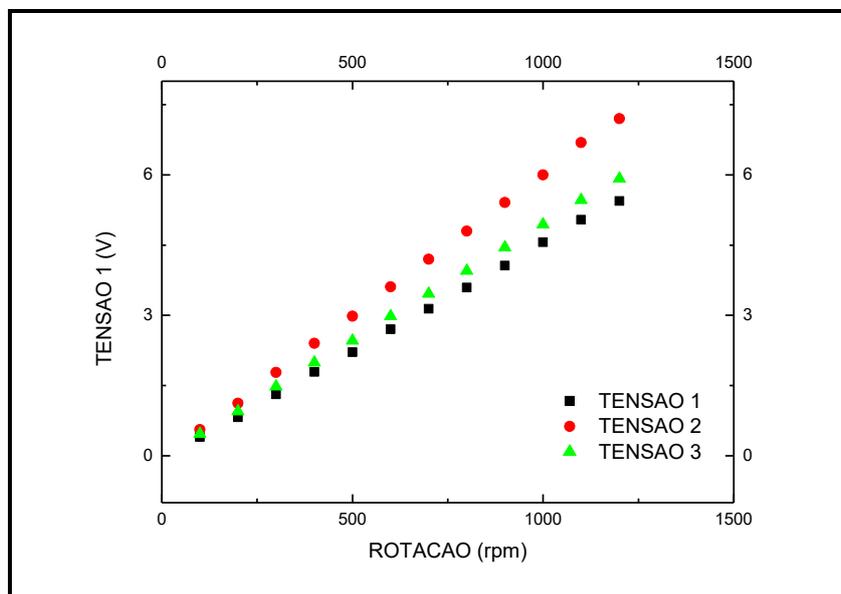
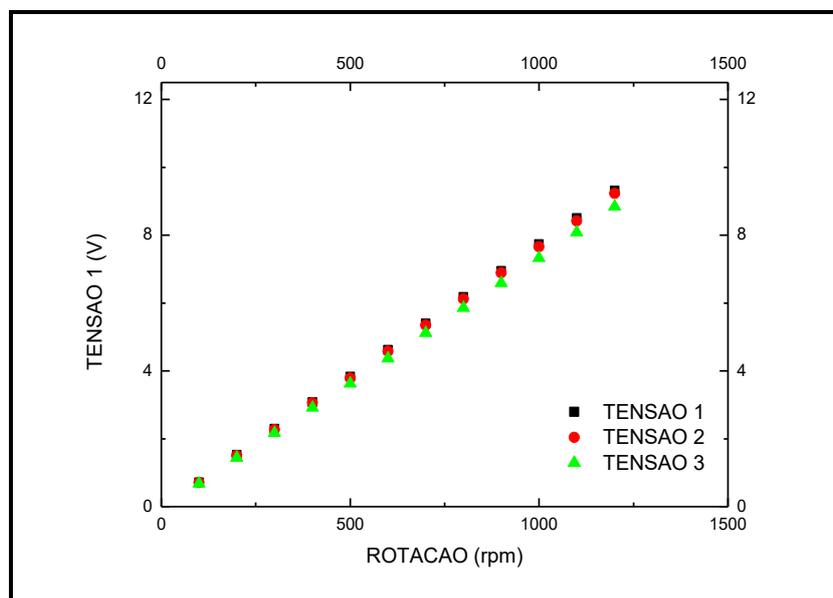


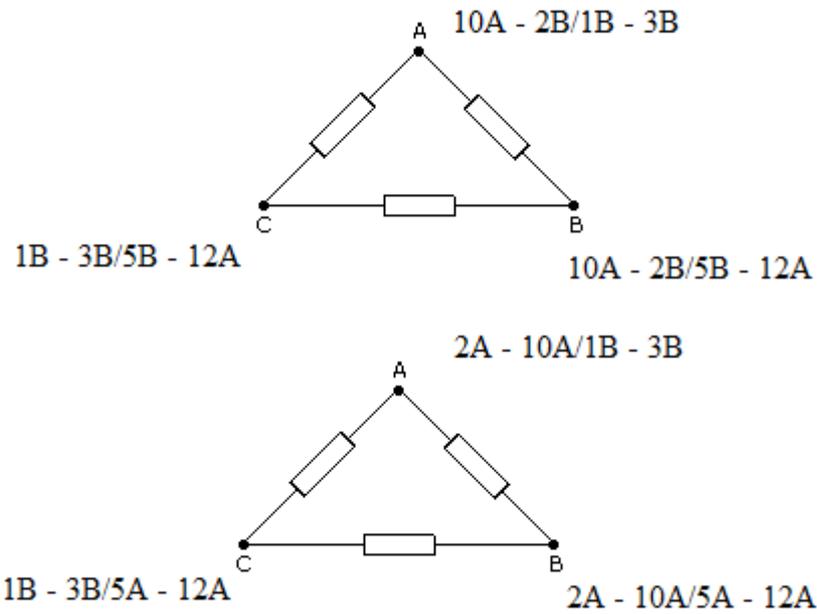
Figura 37– As 3 Tensões do Estator 2, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

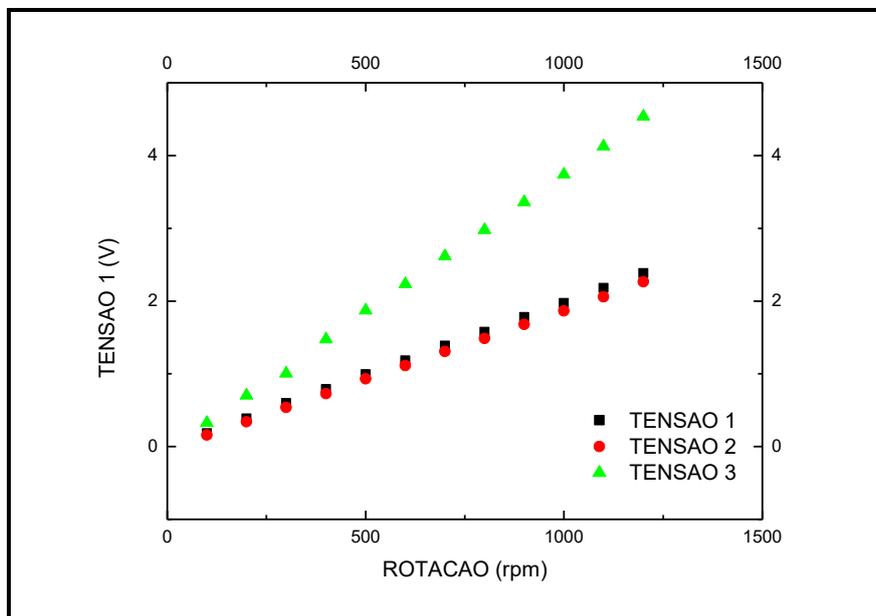
Utilizando associação em triângulo (Δ) na determinação das tensões à vazio.

Conectamos juntos os terminais 10A – 2B, 1B – 3B e 5B -12A do estator 1, e os terminais 2A – 10A, 1B – 3B e 5A – 12A do estator 2, como esquematizado a seguir. As voltagens obtidas são apresentadas nas tabelas dos anexos 13 e 14.



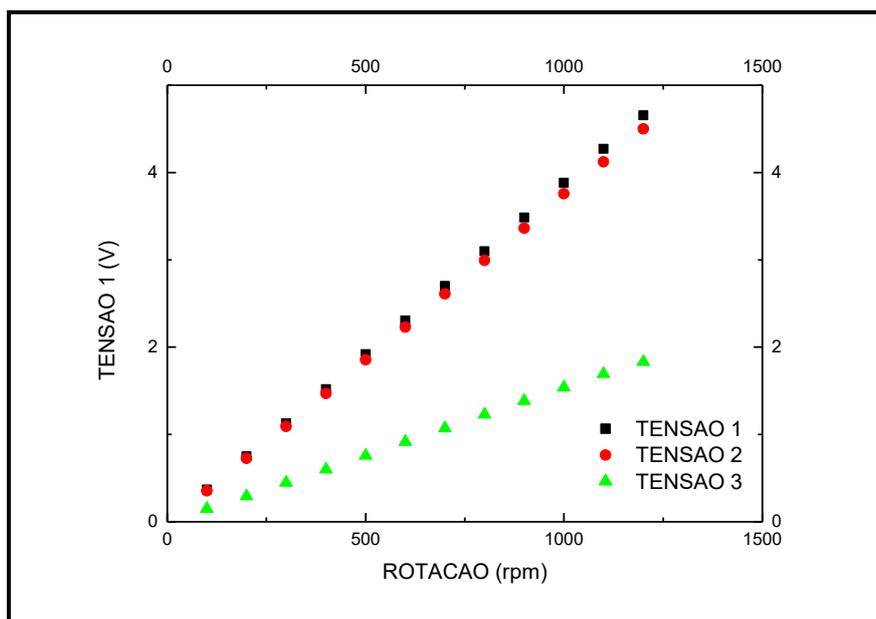
As três tensões de cada estator do gerador não apresentaram a mesma tensão de fase ao serem ligadas em triângulo (Δ) e sem carga, como pode ser evidenciado nas figuras 38 e 39.

Figura 38 – As 3 Tensões do Estator 1, Sistema em Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 39 – As 3 Tensões do Estator 2, Sistema em Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

5.2. Determinação das Tensões e Correntes com carga em função da rotação utilizando-se os dois Rotores

Para o procedimento com carga foram utilizados três resistores de chuva, 127V e 1400W, com ligações independentes de resistências respectivamente: $R_1 = 2,21 \Omega$, $R_2 = 2,25 \Omega$ e $R_3 = 2,23 \Omega$, que foram ligadas diretamente às tensões medidas em cada sistema Y ou Δ , de cada estator.

Para determinar as tensões nos resistores foram utilizados um Multímetro de bancada da marca Minipa modelo MDM – 8045C

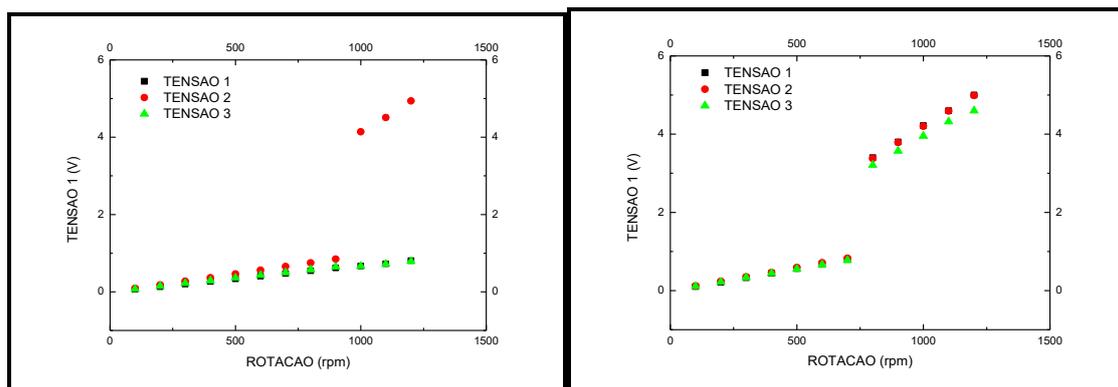
Para as medidas das correntes individuais foram utilizadas Amperímetros da marca INSTRUTHERM, modelo M390.

Realizamos medidas de tensões e correntes diretamente sobre cada resistor, ligados entre fases, para cada estator, ligados em Y ou Δ , obtendo-se as tabelas dos anexos 13 e 14 para associações em estrela 15 e 16 em triângulo.

Comparando as tensões e as correntes das três fases para os dois estatores ligados em estrela são observados nos gráficos 40 e 41, respectivamente.

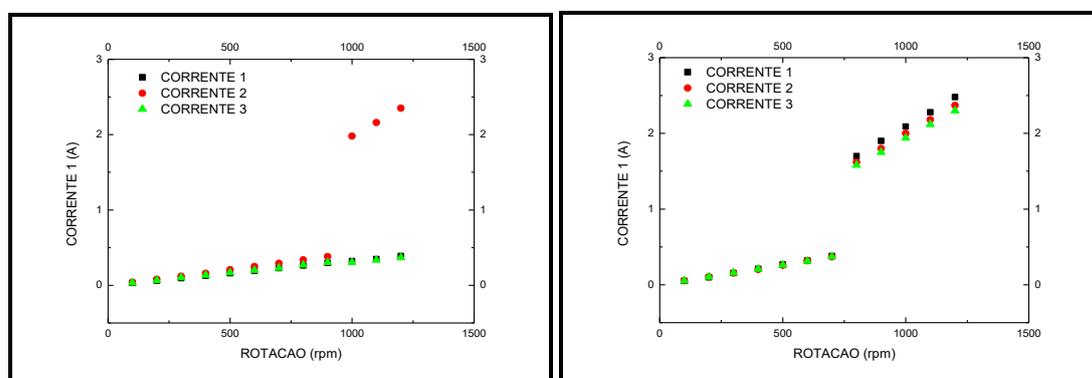
Observou-se um aumento expressivo nas tensões e nas correntes em ambos os estatores em torno de 700 rotações.

Figura 40 – As 3 Tensões dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

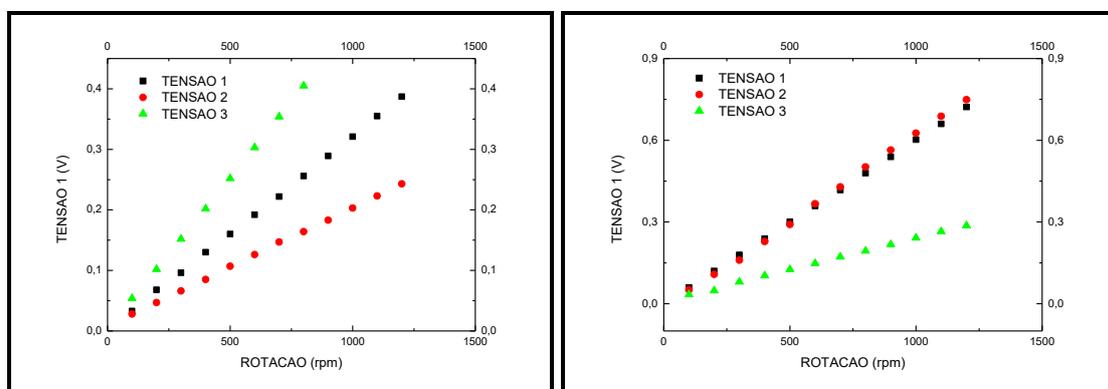
Figura 41 – As 3 Correntes dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

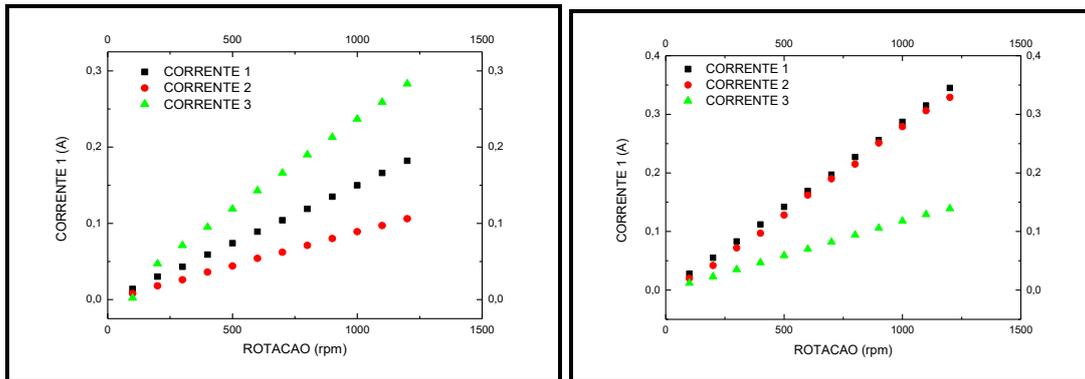
Nas associações em triângulo, em ambos os estatores, foram realizadas medidas de tensões e correntes. Os resultados são apresentados nas figuras 42 e 43.

Figura 42 – As 3 Tensões dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 43 – As 3 Correntes dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Em associações em Triângulo nota-se um aumento progressivo das tensões e das correntes, porém não há um salto imediato em função da rotação, mostrando uma certa linearidade no sistema. Isto não limitou o ponto de operação ótimo do sistema.

5.3. Determinação das Perdas em função da rotação utilizando os dois Rotores

O cálculo das Perdas ôhmicas do gerador é dividido em duas etapas, perdas EDDY e perdas JOWLICAS.

5.3.1 Perdas EDDY

Para a determinação das perdas por correntes parasitas (EDDY), foi utilizada a equação 28.

$$P_{EDDY} = \frac{1}{32} (w \cdot \bar{\beta} \cdot a)^2 \cdot \frac{1}{\rho} \cdot 2 \cdot N \cdot l \cdot \left(\frac{\pi a^2}{4}\right) \quad (27)$$

Onde:

w: velocidade angular do rotor

$\bar{\beta}$: campo magnético médio (0,5 T)

a: diâmetro do condutor (1 mm)

N: número de espiras

l: comprimento do condutor

ρ : resistividade do cobre

Como o gerador foi utilizado em várias rotações, a tabela 14 e 15 trazem os valores dessas perdas por correntes parasitas (P_{EDDY}) para cada fase.

Tabela 14 – Perdas EDDY por Fase para o Estator 1

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(mW)	(mW)	(mW)
100 ±1	1,0 ±0,1	1,0 ±0,1	1,0 ±0,1
200 ±1	4,0 ±0,1	4,0 ±0,1	4,0 ±0,1
300 ±1	10,0 ±0,1	10,0 ±0,1	9,0 ±0,1
400 ±1	18,0 ±0,1	18,0 ±0,1	17,0 ±0,1
500 ±1	27,0 ±0,1	28,0 ±0,1	26,0 ±0,1
600 ±1	40,0 ±0,1	40,0 ±0,1	38,0 ±0,1
700 ±1	54,0 ±0,1	54,0 ±0,1	52,0 ±0,1
800 ±1	70,0 ±0,1	71,0 ±0,1	67,0 ±0,1
900 ±1	89,0 ±0,1	90,0 ±0,1	85,0 ±0,1
1000 ±1	110,0 ±0,1	111,0 ±0,1	105,0 ±0,1
1100 ±1	133,0 ±0,1	134,0 ±0,1	127,0 ±0,1
1200 ±1	158,0 ±0,1	160,0 ±0,1	152,0 ±0,1

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Tabela 15 – Perdas EDDY por Fase para o Estator 2

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(mW)	(mW)	(mW)
100 ±1	1,0 ±0,1	1,0 ±0,1	1,0 ±0,1
200 ±1	4,0 ±0,1	4,0 ±0,1	4,0 ±0,1
300 ±1	10,0 ±0,1	10,0 ±0,1	10,0 ±0,1
400 ±1	17,0 ±0,1	17,0 ±0,1	18,0 ±0,1
500 ±1	27,0 ±0,1	27,0 ±0,1	20,0 ±0,1
600 ±1	38,0 ±0,1	39,0 ±0,1	39,0 ±0,1
700 ±1	52,0 ±0,1	53,0 ±0,1	54,0 ±0,1
800 ±1	68,0 ±0,1	69,0 ±0,1	70,0 ±0,1
900 ±1	86,0 ±0,1	88,0 ±0,1	89,0 ±0,1
1000 ±1	106,0 ±0,1	108,0 ±0,1	109,0 ±0,1
1100 ±1	129,0 ±0,1	131,0 ±0,1	132,0 ±0,1
1200 ±1	153,0 ±0,1	156,0 ±0,1	158,0 ±0,1

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

5.3.2 Perdas Joule

As perdas por efeito Joule foram determinadas pela equação 29, levou-se em consideração a carga de cada fase e as variações de tensões e correntes em cada rotação do estator.

$$P_{JOULE} = N_{bobina} \cdot I^2 \cdot R_{bobina} \quad (28)$$

Onde:

N_{bobina} : Número de espiras por fase

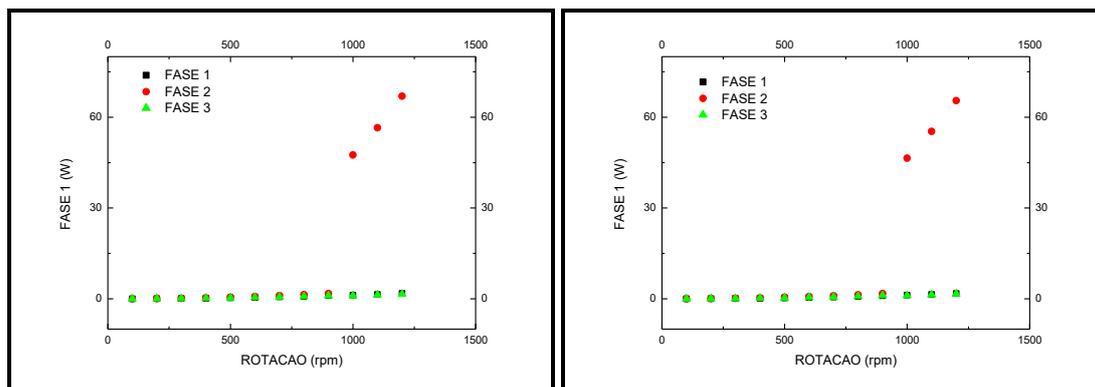
I: Corrente na fase

R_{bobina} : Resistência da bobina.

Os anexos 17 e 18 trazem as perdas por efeito Joule para o estator 1 e 2, respectivamente, para os resistores ligados em estrela (Y).

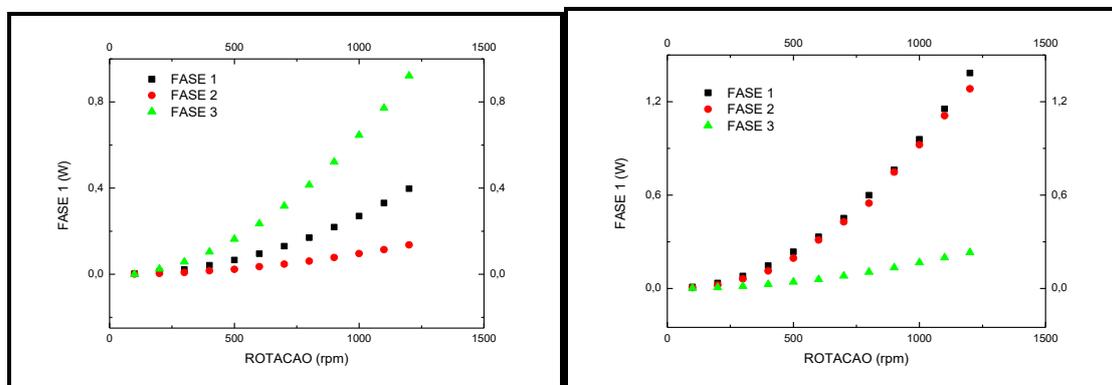
Os anexos 19 e 20 apresentam perdas por efeito Joule para a associações com os mesmos resistores, porém em configuração em triângulo (Δ). Sendo assim foram obtidos os gráficos 44 e 45 comparativamente para cada estator e por fase, para as associações Y e Δ , respectivamente.

Figura 44 – Perdas Joule, por Fase e por Estator, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 45 – Perdas Joule, por Fase e por Estator, Sistema em Δ , em Função da Rotação

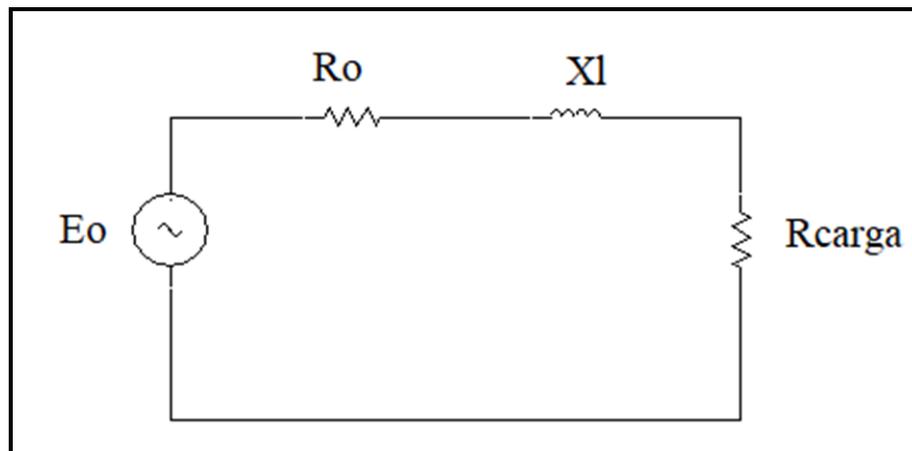


Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Através dos gráficos, observou-se que a partir de 1000 rotações há um aumento expressivo das perdas por efeito Joule em ambos os estatores para ligações em Y. Na ligação em Δ , o aumento é progressivo, porém apresenta valores menores.

5.4. Determinação da Potência do Gerador

Para determinar a potência fornecida pelo gerador é necessário a determinação da impedância (Z) em cada fase, em circuito representado a seguir:



Onde:

E_o : tensão em cada fase, em V;

R_o : resistência da bobina, em Ω ;

X_l : reatância da bobina, em Ω ;

R_{carga} : resistência de carga, em Ω .

Para o cálculo da reatância de cada bobina determinou-se a área total (A_{total}) de cada bobina utilizando-se os diâmetros internos e externos, por fase e por estator, utilizando a equação 30 obtiveram-se os dados das tabelas 16 e 17.

$$A_{total} = \frac{\pi \cdot (D_e - D_i)^2}{4} \quad (29)$$

Onde:

D_e : diâmetro médio externo por fase

D_i : diâmetro médio interno por fase

Tabela 16 – Área de indução por Fase para o Estator 1

	Diam. Ext. (cm)	Diam. Int. (cm)	A_{total} (cm²)
FASE 1: Φ1	25,70 ±0,01	9,34 ±0,01	2,10 ±0,01
FASE 2: Φ2	26,21 ±0,01	8,98±0,01	2,33 ±0,01
FASE 3: Φ3	26,45 ±0,01	9,21±0,01	2,33 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Tabela 17 – Área de indução por Fase para o Estator 2

	Diam. Ext. (cm)	Diam. Int. (cm)	A_{total} (cm²)
FASE 1: Φ1	26,29 ±0,01	9,49 ±0,01	2,22 ±0,01
FASE 2: Φ2	25,88 ±0,01	9,43 ±0,01	2,13 ±0,01
FASE 3: Φ3	26,21 ±0,01	9,40 ±0,01	2,22 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Utilizando a definição de indutância expressa na equação 30 , calculamos os valores de indutância para cada fase nos estatores 1 e 2. Os valores obtidos são apresentados nas tabelas 18 e 19.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A_{total}}{l} \quad (30)$$

onde:

L: indutância da bobina por fase, em μH

μ₀: permeabilidade magnética do meio (4.π.10⁻⁷ N/A)

N: número de espiras

l: comprimento do fio, em m.

Tabela 18 – Indutância por Fase para o Estator 1

	L(μH)
FASE 1: Φ1	0,39 ±0,01
FASE 2: Φ2	0,42 ±0,01
FASE 3: Φ3	0,41 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Tabela 19 – Indutância por Fase para o Estator 2

	L(μH)
FASE 1: Φ1	0,39 ±0,01
FASE 2: Φ2	0,38 ±0,01
FASE 3: Φ3	0,40 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Com os dados apresentados, calculamos a reatância indutiva pela equação 31. Os valores variam em função da rotação do rotor e os valores são apresentados nos anexos 21 e 22.

$$X_l = \omega L \quad (31)$$

onde:

ω : rotação do rotor, em rps

L: indutância da fase, por Estator.

Finalmente determinamos a impedância para as fases dos estatores, levando em consideração as 4 bobinas e a resistência de carga, conforme a equação 32. Os valores obtidos estão nos anexos 23 e 24.

$$Z = (R + R_0) + jX_l \quad (32)$$

em que:

R: resistência da carga, em Ω

R_0 : 4 vezes a resistência das bobinas, em Ω

X_l : reatância indutiva das bobinas, em Ω

A impedância para cada uma das fases nos permitiu determinar a corrente que atravessou a carga, utilizando a tensão à vazio, segundo a equação 33. Os dados obtidos são apresentados nos anexos 25 e 26.

$$I = \frac{E_0}{Z} \quad (33)$$

Onde:

E_0 : corresponde a tensão à vazio, em V.

Finalmente foram somados os produtos da tensão (E_0) pela corrente (I) em cada fase determinando assim a potência trifásica do gerador em função da rotação para um sistema em Y. Os dados obtidos foram apresentados nos anexos 27 e 28.

5.5. Determinação do Rendimento

5.5.1. Determinação dos Rendimentos utilizando os dois Rotores

Na avaliação do rendimento dos estatores ligados em estrela (Y) foi utilizada a equação 34 e estabelecidos, de acordo com a rotação, os dados apresentados nas tabelas 20 e 21.

$$\eta = \frac{P}{(P + P_{EDDY} + P_{JOWLE})} * 100 \quad (34)$$

Sendo:

η : rendimento, em %

P: potência total fornecida, em W

P_{EDDY} : Potência EDDY, em W

P_{JOWLE} : Potência dissipada por efeito Joule, em W.

Tabela 20 – Rendimento do Estator 1 Com Sistema em Estrela (Y)

ROTAÇÃO (rpm)	RENDIMENTO (η%)
100 \pm 1	84,60 \pm 0,01
200 \pm 1	84,87 \pm 0,01
300 \pm 1	85,61 \pm 0,01
400 \pm 1	86,04 \pm 0,01
500 \pm 1	85,47 \pm 0,01
600 \pm 1	85,60 \pm 0,01
700 \pm 1	85,43 \pm 0,01
800 \pm 1	85,35 \pm 0,01
900 \pm 1	85,25 \pm 0,01
1000 \pm 1	37,07 \pm 0,01
1100 \pm 1	37,86 \pm 0,01
1200 \pm 1	37,45 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Tabela 21 – Rendimento do Estator 2 Com Sistema em Estrela (Y)

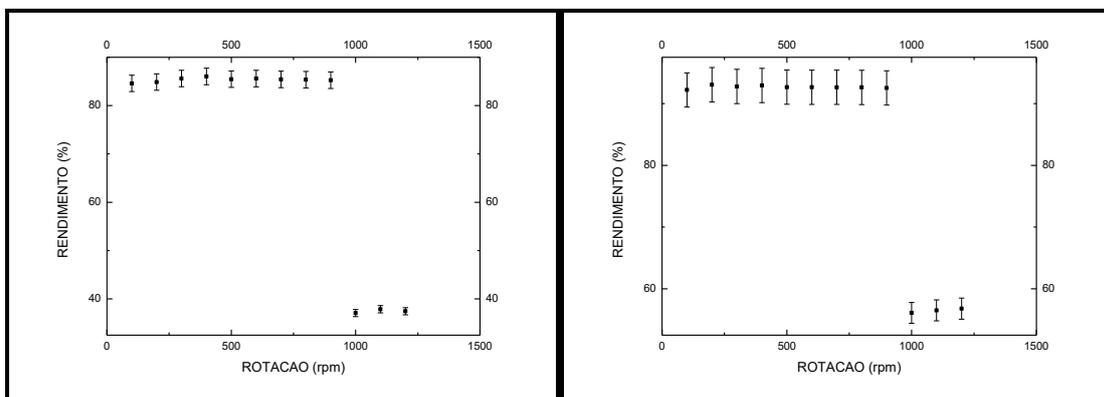
ROTAÇÃO (rpm)	RENDIMENTO (η%)
100 \pm 1	92,21 \pm 0,01
200 \pm 1	93,04 \pm 0,01
300 \pm 1	92,77 \pm 0,01

400 ±1	92,93 ±0,01
500 ±1	92,67 ±0,01
600 ±1	92,65 ±0,01
700 ±1	92,64 ±0,01
800 ±1	92,62 ±0,01
900 ±1	92,53 ±0,01
1000 ±1	56,10 ±0,01
1100 ±1	56,51 ±0,01
1200 ±1	56,79 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Assim foram obtidos os respectivos gráficos de rendimento em função da rotação na figura 46 para os Estatores 1 e 2, respectivamente.

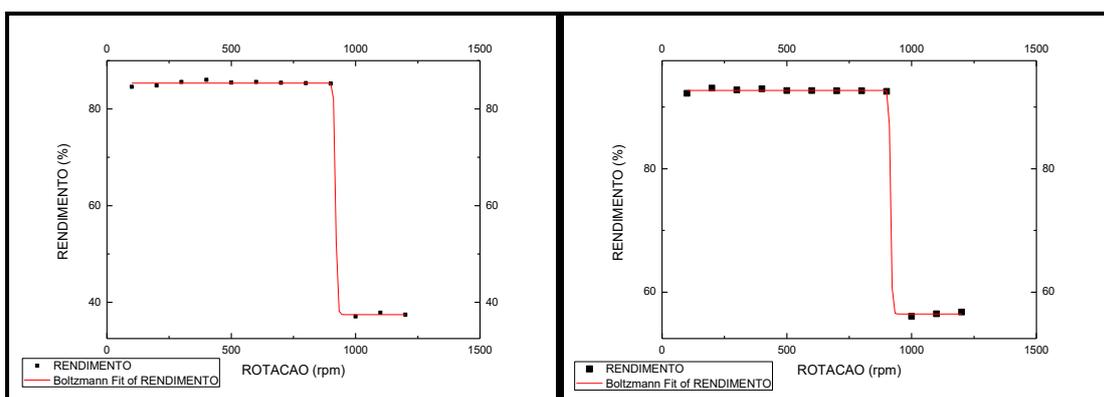
Figura 46 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Em cada uma das curvas foram feitas a linearização de Boltzmann. Na figura 47 mostramos em destaque as curvas linearizadas para cada Estator 1 e 2.

Figura 47 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Y, em Função da Rotação-Linearizada



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Com mesma carga montamos o sistema em triângulo (Δ) e o rendimento calculados com a equação 34 estão presentes nas tabelas 22 e 23.

Tabela 22 – Rendimento do Estator 1 Com Sistema em Triângulo (Δ)

ROTAÇÃO (rpm)	RENDIMENTO ($\eta\%$)
100 \pm 1	94,89 \pm 0,01
200 \pm 1	95,51 \pm 0,01
300 \pm 1	95,35 \pm 0,01
400 \pm 1	95,88 \pm 0,01
500 \pm 1	95,99 \pm 0,01
600 \pm 1	95,95 \pm 0,01
700 \pm 1	95,98 \pm 0,01
800 \pm 1	95,95 \pm 0,01
900 \pm 1	95,97 \pm 0,01
1000 \pm 1	95,97 \pm 0,01
1100 \pm 1	96,00 \pm 0,01
1200 \pm 1	96,05 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

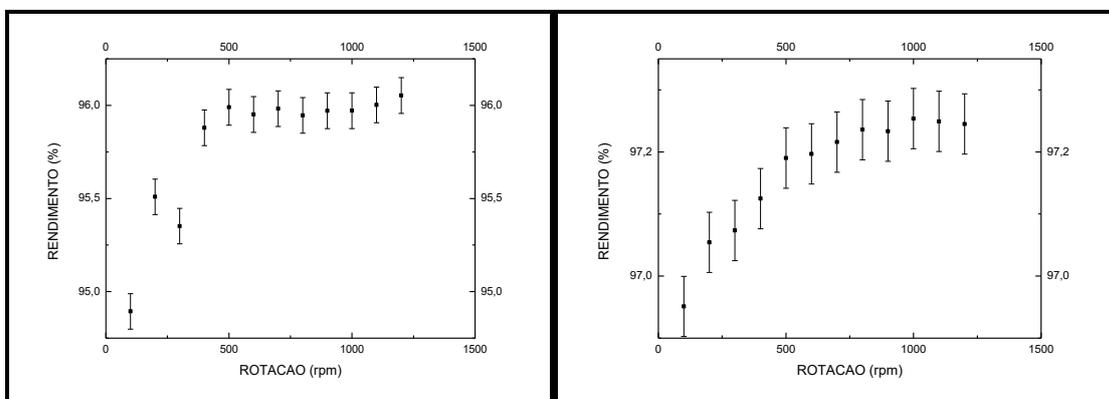
Tabela 23 – Rendimento do Estator 2 Com Sistema em Triângulo (Δ)

ROTAÇÃO (rpm)	RENDIMENTO ($\eta\%$)
100 \pm 1	96,95 \pm 0,01
200 \pm 1	97,05 \pm 0,01
300 \pm 1	97,07 \pm 0,01
400 \pm 1	97,12 \pm 0,01
500 \pm 1	97,19 \pm 0,01
600 \pm 1	97,20 \pm 0,01
700 \pm 1	97,22 \pm 0,01
800 \pm 1	97,24 \pm 0,01
900 \pm 1	97,23 \pm 0,01
1000 \pm 1	97,25 \pm 0,01
1100 \pm 1	97,25 \pm 0,01
1200 \pm 1	97,24 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

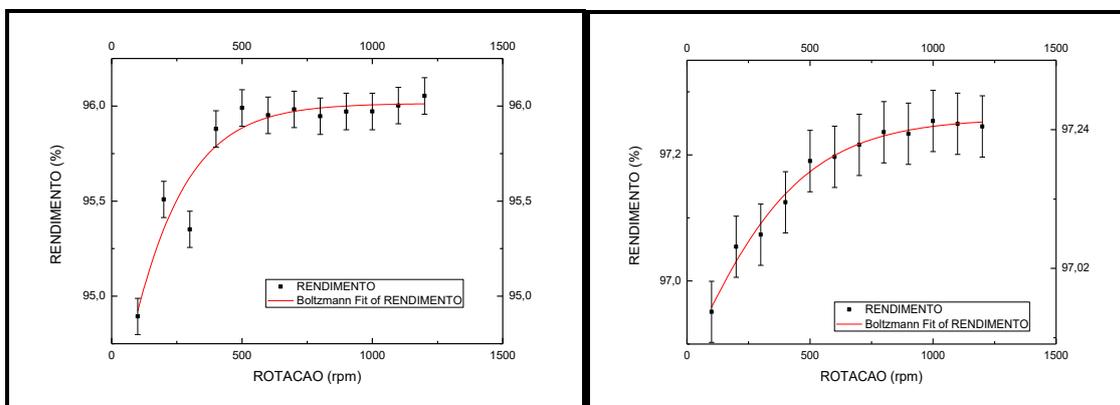
Os valores de rendimento nas configuração triângulo (Δ) são apresentados em função da velocidade de rotação nas figuras 48 e 49.

Figura 48 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Velocidade de Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 49 – Rendimento dos Estatores, Sistema em Δ , em Função da Velocidade de Rotação - Linearizada



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Com as curvas linearizadas foi possível observar que a partir de 900 rpm há uma estabilização do rendimento entre 85 e 92% em Y. Na configuração Δ este aumento variou muito pouco, em torno de 95 a 97%.

5.5.2. Determinação dos Rendimentos utilizando um Rotor

Para se utilizar o princípio da sobreposição de efeitos determinamos as mesmas grandezas utilizando um rotor de cada vez.

Retirou-se o rotor 2 e mediu-se tensões e correntes sobre cargas trifásicas resistivas em cada Estator, nas associações Y e Δ .

Os Anexos 29 e 30 apresentam tensões e correntes nos Estatores 1 e 2 ligados às cargas em associação em Y e os 31 e 32 para associações em Δ , todos utilizando apenas o Rotor 1.

Os Anexos 33, 34, 35 e 36 da mesma maneira que o anterior, porém utilizando apenas o Rotor 2.

De maneira análoga foram obtidas todas as grandezas relativas aos Estatores e a tabela 24 mostram o rendimento dos Estatores 1 e 2 em função do Rotor 1 e do tipo de ligação.

Tabela 24 – Rendimento do Estatores em Função da ligação e do Rotor 1

ROTAÇÃO (rpm)	RENDIMENTO ($\eta\%$)			
	LIGAÇÃO Y		LIGAÇÃO Δ	
	ESTATOR 1	ESTATOR 2	ESTATOR 1	ESTATOR 2
100 \pm 1	93,70 \pm 0,01	98,99 \pm 0,01	95,88 \pm 0,01	99,33 \pm 0,01
200 \pm 1	94,04 \pm 0,01	99,16 \pm 0,01	96,07 \pm 0,01	99,40 \pm 0,01
300 \pm 1	94,43 \pm 0,01	99,17 \pm 0,01	96,41 \pm 0,01	99,41 \pm 0,01
400 \pm 1	94,41 \pm 0,01	99,18 \pm 0,01	96,48 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01
500 \pm 1	94,44 \pm 0,01	99,17 \pm 0,01	96,45 \pm 0,01	99,41 \pm 0,01
600 \pm 1	94,51 \pm 0,01	99,18 \pm 0,01	96,52 \pm 0,01	99,41 \pm 0,01
700 \pm 1	94,45 \pm 0,01	99,18 \pm 0,01	96,43 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01
800 \pm 1	94,40 \pm 0,01	99,18 \pm 0,01	96,41 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01
900 \pm 1	94,37 \pm 0,01	99,19 \pm 0,01	96,43 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01
1000 \pm 1	94,28 \pm 0,01	99,18 \pm 0,01	96,40 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01
1100 \pm 1	94,42 \pm 0,01	99,19 \pm 0,01	96,44 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01
1200 \pm 1	94,32 \pm 0,01	99,19 \pm 0,01	96,37 \pm 0,01	99,42 \pm 0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

A tabela 25, da mesma maneira, para o Rotor 2.

Tabela 25 – Rendimento do Estatores em Função da ligação e do Rotor 2

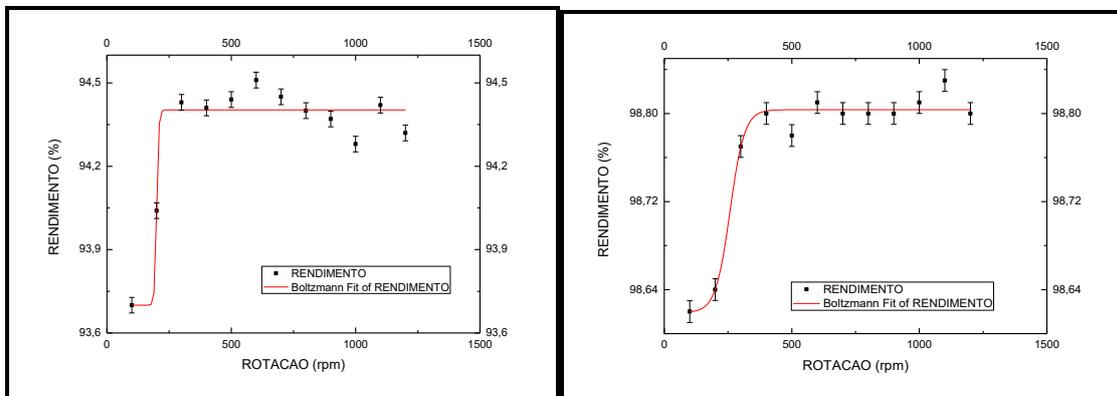
ROTAÇÃO (rpm)	RENDIMENTO ($\eta\%$)			
	LIGAÇÃO Y		LIGAÇÃO Δ	
	ESTATOR 1	ESTATOR 2	ESTATOR 1	ESTATOR 2
100 \pm 1	98,62 \pm 0,01	92,12 \pm 0,01	98,65 \pm 0,01	96,93 \pm 0,01
200 \pm 1	98,64 \pm 0,01	89,65 \pm 0,01	98,69 \pm 0,01	97,28 \pm 0,01
300 \pm 1	98,77 \pm 0,01	89,68 \pm 0,01	98,83 \pm 0,01	97,21 \pm 0,01
400 \pm 1	98,80 \pm 0,01	89,59 \pm 0,01	98,86 \pm 0,01	97,28 \pm 0,01
500 \pm 1	98,78 \pm 0,01	89,32 \pm 0,01	98,84 \pm 0,01	97,21 \pm 0,01
600 \pm 1	98,81 \pm 0,01	89,29 \pm 0,01	98,86 \pm 0,01	97,23 \pm 0,01

700 ±1	98,80 ±0,01	89,19 ±0,01	98,86 ±0,01	97,23 ±0,01
800±1	98,80 ±0,01	89,67 ±0,01	98,85 ±0,01	97,19 ±0,01
900 ±1	98,80 ±0,01	41,03 ±0,01	98,87 ±0,01	97,15 ±0,01
1000 ±1	98,81 ±0,01	41,32 ±0,01	98,87 ±0,01	97,13 ±0,01
1100 ±1	98,83 ±0,01	37,08 ±0,01	98,88 ±0,01	97,12 ±0,01
1200 ±1	98,80 ±0,01	38,01 ±0,01	98,78 ±0,01	97,16 ±0,01

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

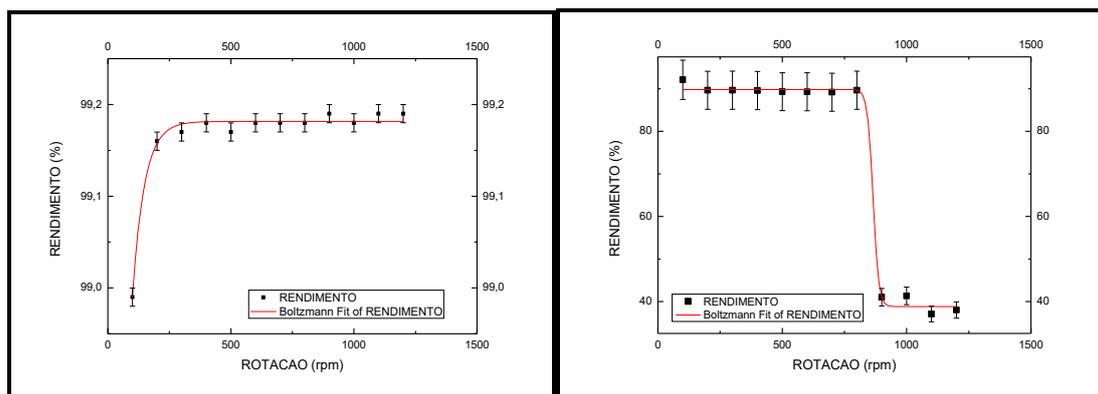
As Figuras 50, 51, 52 e 53 trazem uma comparação, linearizada, entre o rendimento de cada Estator, equivalente a cada ligação, em função dos Rotores 1 e 2.

Figura 50 – Rendimento do Estator 1, Sistema em Y, em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2



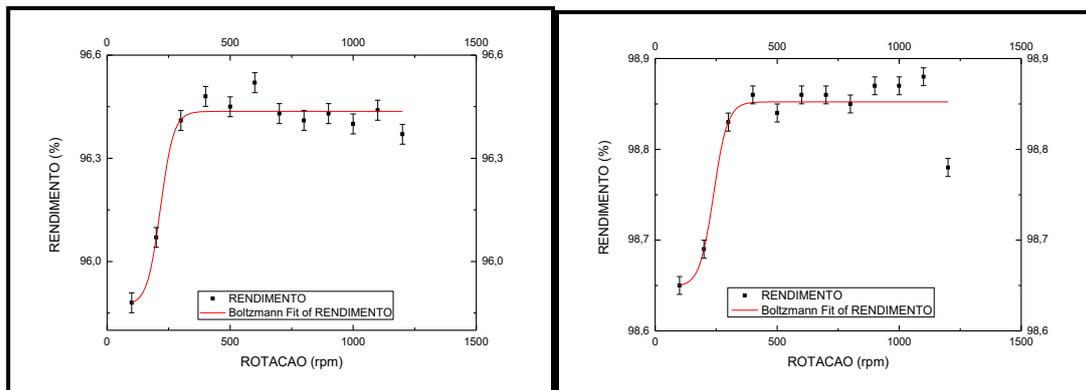
Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 51 – Rendimento do Estator 2, Sistema em Y, em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2



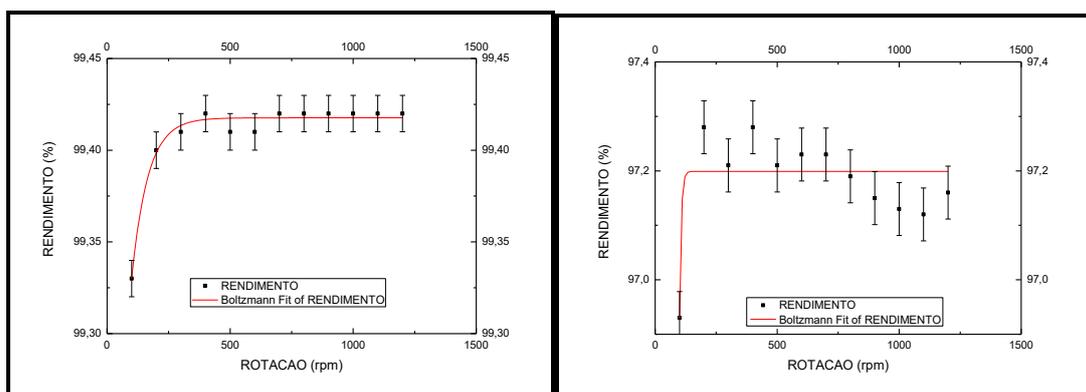
Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 52 – Rendimento do Estator 1, Sistema em Δ , em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 53 – Rendimento do Estator 2, Sistema em Δ , em Função da Rotação – Linearizada – com Rotores 1 e 2



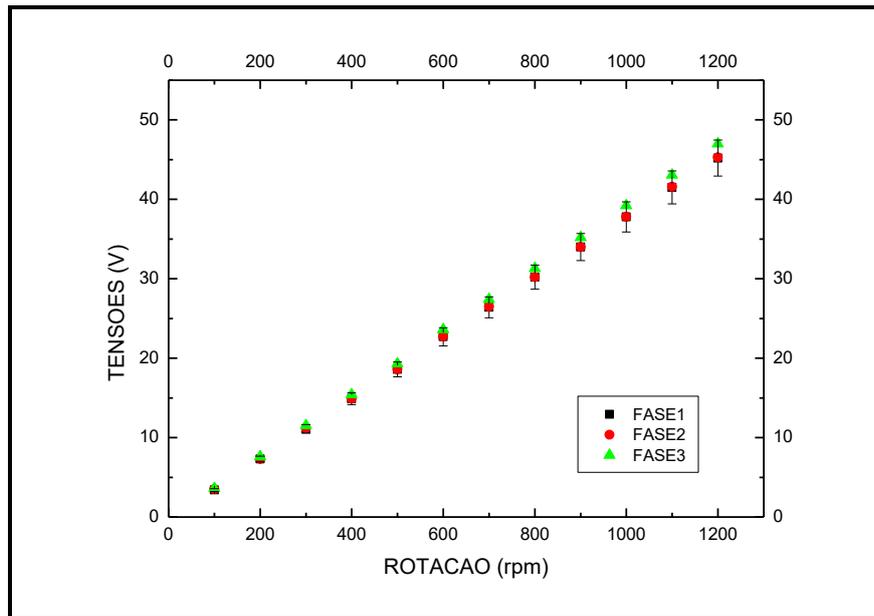
Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

5.6. Determinação das Tensões à vazio em função da rotação com dois Rotores e um Estator

Todas as leituras de tensões foram feitas utilizando um multímetro de bancada da Minipa, modelo MDM – 8045C, como mostrado no Anexo 12.

As tensões em Y, para o estator sem carga estão mostrados na Figura 54

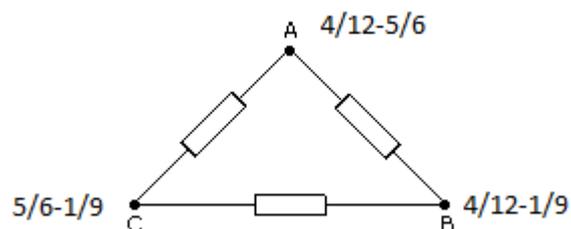
Figura 54 – As 3 Tensões do Estator, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

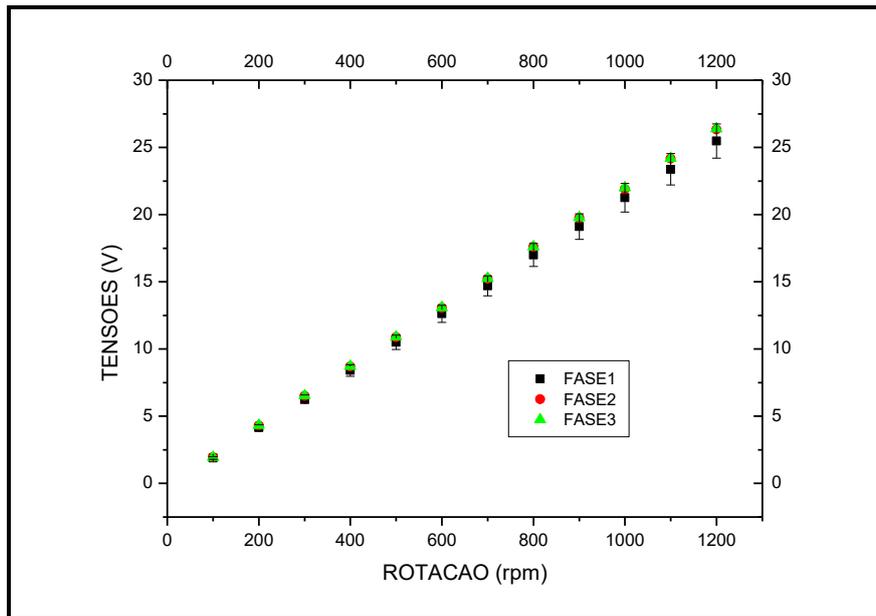
Utilizamos associação em Triângulo (Δ) na determinação das tensões à vazio do Estator.

Para o Estator interligou-se os terminais: 1 – 9, 4 – 12 e 5 -6, como esquematizado a seguir.



Representando as três tensões de cada estator do gerador não se observa praticamente a mesma tensão das três fases com ligação em triângulo (Δ) sem carga, mostrado na Figura 55.

Figura 55 – As 3 Tensões do Estator, Sistema em Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Para o procedimento com carga foram utilizados três resistores de chuveiro, 127V e 1400W, com ligações independentes de resistências respectivamente: $R_1 = 2,21 \Omega$, $R_2 = 2,25 \Omega$ e $R_3 = 2,23 \Omega$, que foram ligadas diretamente às tensões medidas em cada sistema Y ou Δ , de cada Estator.

Para a determinação de tensões nos resistores foram utilizados um Multímetro de bancada da marca Minipa modelo MDM – 8045C.

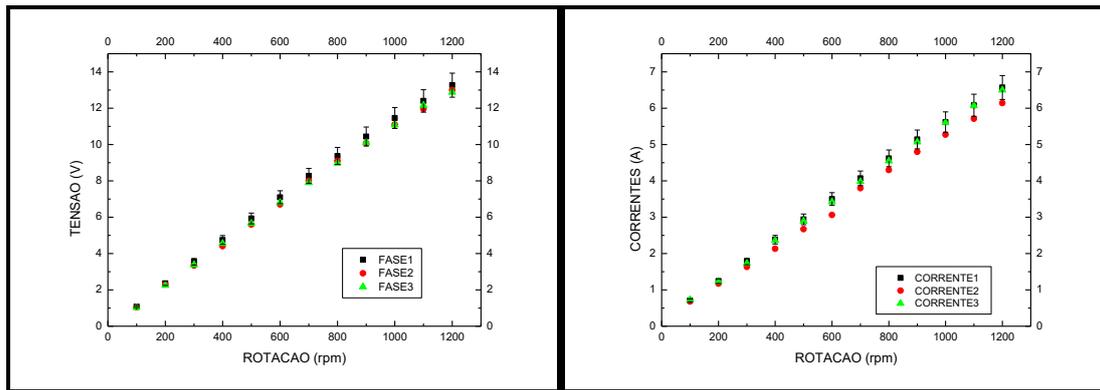
As determinações das correntes individuais foram utilizadas Amperímetros da marca INSTRUTHERM, modelo M390.

Foram medidas tensões e correntes diretamente em cada resistor, ligados entre fases, ligados em Y ou Δ .

A figura 56 mostra as tensões e correntes no Estator em Y e a figura 57 para a associação em Δ .

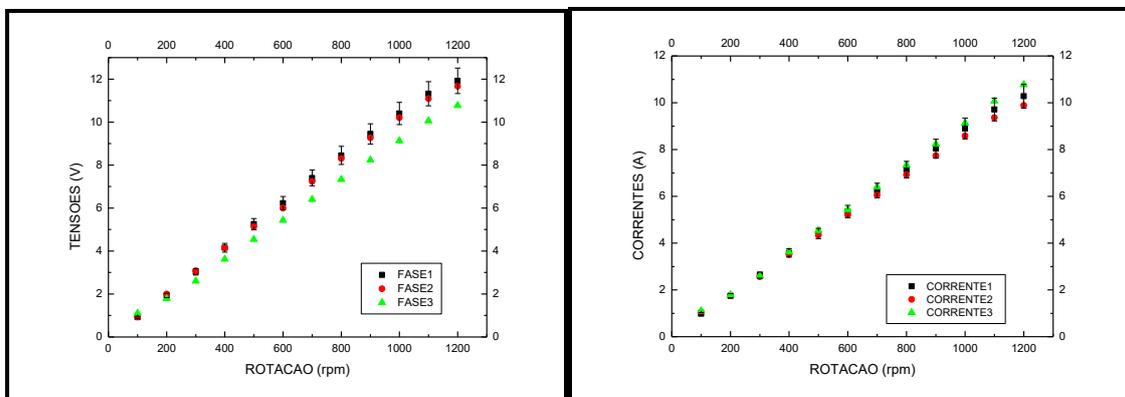
Observa-se uma linearidade de tensões e correntes em ambas as associações.

Figura 56 – As 3 Tensões e Correntes do Estator, Sistema em Y, em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Figura 57 – As 3 Tensões e Correntes do Estator, Sistema em Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

O cálculo das Perdas ôhmicas do gerador é dividido em duas etapas, perdas EDDY e perdas por efeito Joule como a do gerador anterior.

Como o gerador foi utilizado em várias rotações, a tabela 26 traz os valores dessas perdas por correntes parasitas (P_{EDDY}) por fase, para o Estator.

Tabela 26 – Perdas EDDY por Fase para o Estator

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(mW)	(mW)	(mW)
100 ±1	6,0 ±0,1	6,0 ±0,1	6,0 ±0,1
200 ±1	23,0 ±0,1	23,0 ±0,1	23,0 ±0,1
300 ±1	51,0 ±0,1	51,0 ±0,1	51,0 ±0,1
400 ±1	91,0 ±0,1	90,0 ±0,1	91,0 ±0,1
500 ±1	142,0 ±0,1	141,0 ±0,1	143,0 ±0,1
600 ±1	205,0 ±0,1	203,0 ±0,1	205,0 ±0,1
700 ±1	279,0 ±0,1	276,0 ±0,1	280,0 ±0,1
800 ±1	364,0 ±0,1	360,0 ±0,1	365,0 ±0,1
900 ±1	461,0 ±0,1	456,0 ±0,1	462,0 ±0,1
1000 ±1	569,0 ±0,1	563,0 ±0,1	571,0 ±0,1
1100 ±1	688,0 ±0,1	681,0 ±0,1	691,0 ±0,1
1200 ±1	819,0 ±0,1	810,0 ±0,1	822,0 ±0,1

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

As perdas por efeito Joule foram determinadas pela equação 39, levando-se em consideração a carga de cada fase e as variações de tensões e correntes em cada rotação e por Estator.

As tabelas 27 e 28 trazem os valores determinados para as associações do Estator em Y e Δ , respectivamente.

Tabela 27 – Perdas por efeito Joule por Fase para o Estator em Y

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(W)	(W)	(W)
100 ±1	31,341 ±0,001	28,426 ±0,001	33,238 ±0,001
200 ±1	95,596 ±0,001	84,152 ±0,001	94,363 ±0,001
300 ±1	196,985 ±0,001	163,331 ±0,001	186,673±0,001
400 ±1	352,167 ±0,001	278,902 ±0,001	347,387 ±0,001
500 ±1	537,389 ±0,001	438,243 ±0,001	520,937 ±0,001
600 ±1	761,606 ±0,001	575,620 ±0,001	729,528 ±0,001
700 ±1	1029,871 ±0,001	887,687 ±0,001	987,997 ±0,001
800 ±1	1327,022 ±0,001	1136,658	1291,256

		$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
900 ± 1	1642,557 $\pm 0,001$	1416,365 $\pm 0,001$	1603,265 $\pm 0,001$
1000 ± 1	1963,662 $\pm 0,001$	1707,316 $\pm 0,001$	1955,985 $\pm 0,001$
1100 ± 1	2298,271 $\pm 0,001$	2004,310 $\pm 0,001$	2298,089 $\pm 0,001$
1200 ± 1	2683,644 $\pm 0,001$	2317,552 $\pm 0,001$	2635,216 $\pm 0,001$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

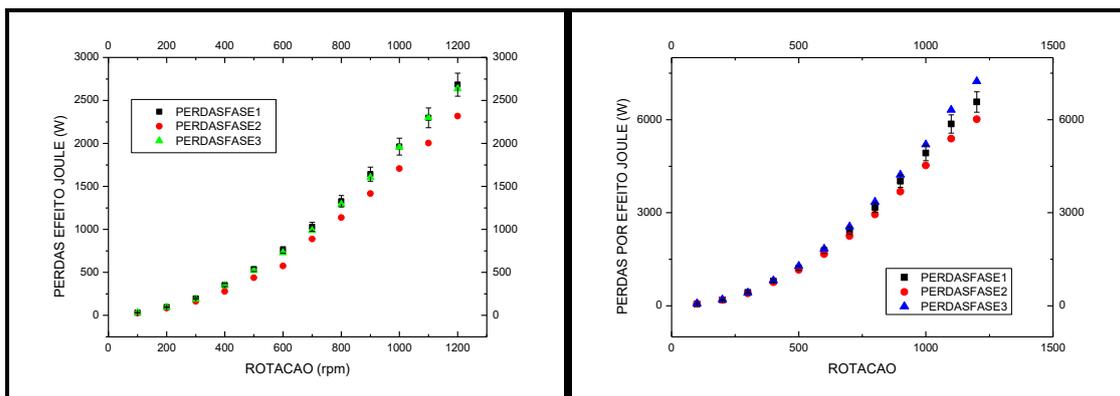
Tabela 28 – Perdas por efeito Joule por Fase para o Estator em Δ

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(W)	(W)	(W)
100 ± 1	59,710 $\pm 0,001$	67,775 $\pm 0,001$	75,4701 $\pm 0,001$
200 ± 1	190,401 $\pm 0,001$	190,422 $\pm 0,001$	199,846 $\pm 0,001$
300 ± 1	430,037 $\pm 0,001$	402,877 $\pm 0,001$	421,635 $\pm 0,001$
400 ± 1	796,820 $\pm 0,001$	757,368 $\pm 0,001$	817,347 $\pm 0,001$
500 ± 1	1209,125 $\pm 0,001$	1157,903 $\pm 0,001$	1285,586 $\pm 0,001$
600 ± 1	1779,515 $\pm 0,001$	1662,262 $\pm 0,001$	1839,031 $\pm 0,001$
700 ± 1	2428,590 $\pm 0,001$	2250,109 $\pm 0,001$	2554,756 $\pm 0,001$
800 ± 1	3169,499 $\pm 0,001$	2943,777 $\pm 0,001$	3351,177 $\pm 0,001$
900 ± 1	4018,891 $\pm 0,001$	3682,771 $\pm 0,001$	4224,634 $\pm 0,001$
1000 ± 1	4924,636 $\pm 0,001$	4525,508 $\pm 0,001$	5199,134 $\pm 0,001$
1100 ± 1	5861,822 $\pm 0,001$	5385,729 $\pm 0,001$	6312,268 $\pm 0,001$
1200 ± 1	6570,227 $\pm 0,001$	6012,919 $\pm 0,001$	7234,706 $\pm 0,001$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Na Figura 58 é mostrada uma comparação das Perdas por Efeito Joule em sistemas em Y e Δ , respectivamente.

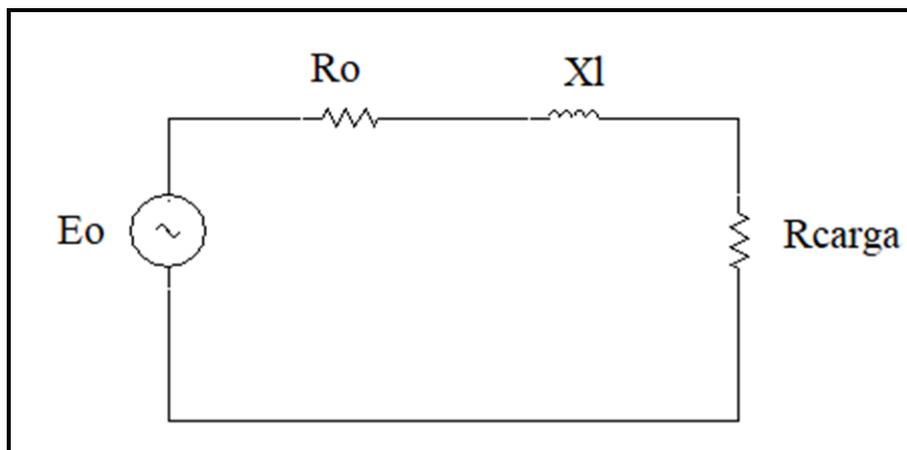
Figura 58 – Perdas Joule, por Fase Sistema em Y e Δ , em Função da Rotação



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Através dos gráficos, observou-se que a partir de 800 rotações há um aumento expressivo das perdas Joule em ambas as ligações.

Para a determinação da Potência fornecida pelo Gerador, por Estator, é necessário a determinação da impedância (Z) por fase como representado abaixo:



Inicialmente determinou-se a Área de cada bobina que gera o campo magnético, utilizando-se os diâmetros internos e externos, por fase e por Estator, utilizando a equação 40, citada anteriormente, obtém-se os dados da tabela 29.

Tabela 29 – Área de indução por Fase para o Estator

	Diâmetro Externo (cm)	Diâmetro Interno (cm)	A_{total} (cm²)
FASE 1: $\Phi 1$	31,60 $\pm 0,01$	5,00 $\pm 0,01$	5,56 $\pm 0,01$
FASE 2: $\Phi 2$	31,60 $\pm 0,01$	5,00 $\pm 0,01$	5,56 $\pm 0,01$
FASE 3: $\Phi 3$	31,60 $\pm 0,01$	5,00 $\pm 0,01$	5,56 $\pm 0,01$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Utilizando-se da definição de indutância com a equação 41, citada anteriormente, são determinados na tabela 30.

Tabela 30 – Indutância por Fase para o Estator

	L(μH)
FASE 1: $\Phi 1$	1,95 $\pm 0,01$
FASE 2: $\Phi 2$	1,94 $\pm 0,01$
FASE 3: $\Phi 3$	1,96 $\pm 0,01$

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Determinou-se assim a Reatância Indutiva pela equação 43, que terá valores variáveis em função da rotação do rotor.

Finalmente determinaram-se a impedância por fase por Estator levando-se em consideração as 4 bobinas e a resistência de carga, conforme a equação 43.

Após o cálculo da impedância foi possível determinar a corrente entre a carga com a tensão à vazio, segundo a equação 44.

Assim com a soma das três fases do produto da tensão (E_0) pela corrente (I) foi possível determinar a Potência trifásica em função da rotação do motor, para o sistema em Y, obtendo-se a tabela 31.

Tabela 31 – Potências Trifásicas para o Estator ligados em Y, em função da rotação

ROTAÇÃO (rpm)	POTÊNCIAS 3 Φ(W)
100 \pm 1	10,588 \pm 0,001
200 \pm 1	47,328 \pm 0,001
300 \pm 1	109,692 \pm 0,001
400 \pm 1	196,172 \pm 0,001
500 \pm 1	306,537 \pm 0,001
600 \pm 1	457,191 \pm 0,001
700 \pm 1	619,158 \pm 0,001
800 \pm 1	807,452 \pm 0,001
900 \pm 1	1022,657 \pm 0,001
1000 \pm 1	1265,510 \pm 0,001
1100 \pm 1	1528,333 \pm 0,001
1200 \pm 1	1815,498 \pm 0,001

Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

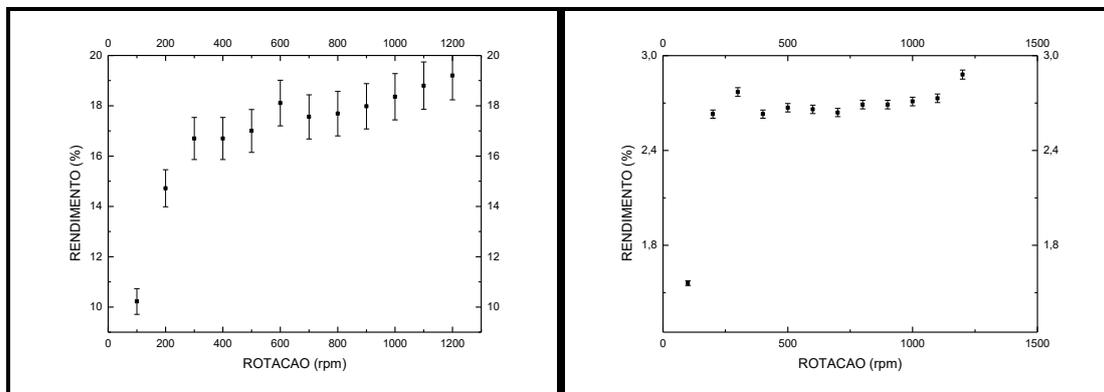
E para a associação em Δ , mostrado na tabela 32.

Tabela 32 – Potências Trifásicas para o Estator ligados em Δ , em função da rotação

ROTAÇÃO (rpm)	POTÊNCIAS 3 Φ(W)
100 \pm 1	3,219 \pm 0,001
200 \pm 1	15,682 \pm 0,001
300 \pm 1	35,765 \pm 0,001
400 \pm 1	63,960 \pm 0,001
500 \pm 1	100,047 \pm 0,001
600 \pm 1	144,244 \pm 0,001
700 \pm 1	196,162 \pm 0,001
800 \pm 1	261,618 \pm 0,001
900 \pm 1	330,149 \pm 0,001
1000 \pm 1	407,519 \pm 0,001
1100 \pm 1	493,720 \pm 0,001
1200 \pm 1	586,835 \pm 0,001

Assim foi possível a determinação do rendimento para cada sistema em Y e Δ , mostrados na figura 59.

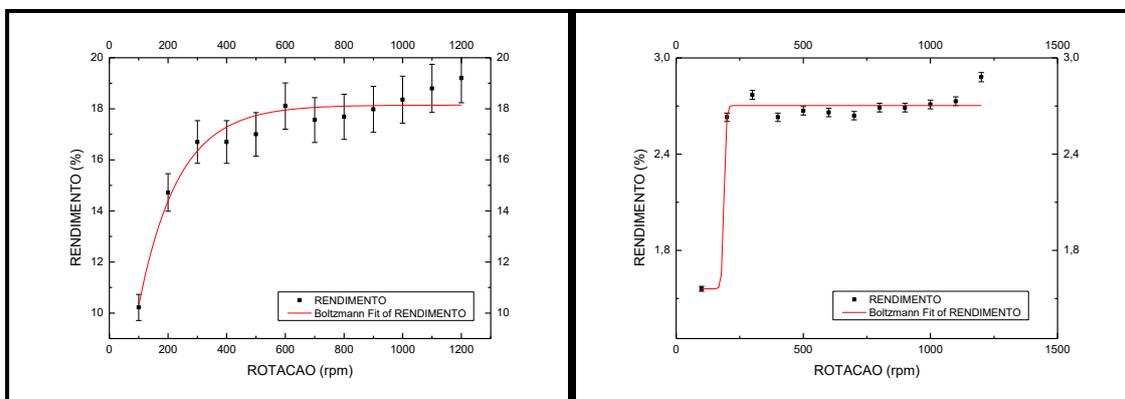
Figura 59 – Rendimento do Estator, Sistema em Y e Δ , em Função da Rotação.



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Em cada uma das curvas foi feita a linearização de Boltzmann e a figura 60 mostra isso em destaque para cada associação, respectivamente.

Figura 60 – Rendimento do Estator, Sistema em Y e Δ , em Função da Rotação.



Fonte: [Arquivo Pessoal do Autor]

Observa-se claramente que a estabilidade dos geradores se iniciam em 400 rotações, porém o rendimento atingido pelas duas associações é baixo, sendo em Δ a menor delas, não atingindo nem 2,8%.

6. CONCLUSÕES

Os geradores elétricos convencionais utilizam núcleos ferromagnéticos com alta permeabilidade magnética, que além de concentrar o fluxo no núcleo, guia-o até o

estator. Isto elimina as perdas por histerese e correntes parasitas, apresentando um torque de “cogging” nulo. No entanto, no arranjo Halbach, a ausência do núcleo ferromagnético é compensada pela alta densidade do fluxo magnético.

O rendimento dos estatores com 2 rotores apresentaram um elevado valor de rendimento, da ordem de 85 a 92% em uma rotação de 900 rpm. Porém as perdas aumentaram muito a partir de 1000 rpm, para medidas feitas com cargas puramente resistivas.

Na análise com um rotor os rendimentos cresceram para valores próximos à 99%, independentes da rotação, porém a influência do campo magnético sobre o estator oposto foi baixa.

Testamos também duas formas de associação do estator com carga. Na associação em estrela (Y) a rotação tem uma forte influência no rendimento, caindo rapidamente a partir de 900 rotações. Na ligação em triângulo (Δ), a tensão e correntes tem um crescimento contínuo, sem variações bruscas quando se modifica o valor da rotação.

Devido à ligação em Y apresentar valores elevados de correntes e tensão a partir de 900 rpm não foi possível ligar os dois estatores em série. Isto poderia elevar a corrente e provocar um sobreaquecimento, fundindo o esmalte de proteção dos fios e provocando um curto-circuito das bobinas.

Os ímãs utilizados no rotor possuem forma cúbica, produzindo espaços vazios que não foram preenchidos. Porém o espaço vazio entre o rotor e estator ficaram em torno de 6,5 mm o que pôde provocar perdas de linhas de magnetização e consequente falta de indução de tensão nos estatores.

O gerador utilizando o arranjo de Halbach mostrou-se extremamente eficiente, principalmente em associações com cargas resistivas em estrela (Y) em 900 rpm e em associações em (Δ) para quaisquer rotações até 1200 rpm. Porém a diminuição do espaço de vazio entre o rotor e o estator é necessário para evitar as perdas de magnetização.

7. REFERÊNCIAS

[ARDUINO2016]. Disponível em:<<https://www.arduino.cc/>> Acesso em 02 out. 2016

[ARGYRIS1995] J. H. Energy theorems and structural analysis // Aircraft Engineering, 1954, Vol. 26, Part 1 (Oct. – Nov.), 1955, Vol. 27, Part 2 (Feb. – May).

[AZEVEDO2003] A. F. M. Método dos Elementos Finitos. 2003. Disponível em:<http://alvaroazevedo.com/publications/books/Livro_MEF_AA_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf>

[BARKANOV2001], E. Introduction to the Finite Element Method. Riga Technical University. 2001.

[BOMBASUL2016]. Mostruário de esquemas elétricos. Disponível em: <http://bombasul.com.br/produtos/partida-compensadora/> Acesso em 11 dez. 2016

[BOYLESTAD] B. Robert L. “**Introdução à Análise de Circuitos**”, 10ª Edição, Editora Prentice Hall, São Paulo, 2004.

[BRONAUGH1995] B. Edwin L., “**Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity**”, in IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1995, Symposium Record, pp. 72-76.

[CARTER1967] C. George W. “**The Electromagnetic Field in its Engineering Aspects**”, Longmans, 1967. Catálogo do Termopar- tipo K. Cold-Junction-Compensated K-Thermocoupleto-Digital Converter. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/MAX31855.html>> Acesso em 10 out. 2016

[CLOUGH1960] C. R. W. The finite element method in plane stress analysis. // Proc. American Society of Civil Engineers (2nd Conference on Electronic Computation, Pitsburg, Pennsylvania), 1960, Vol. 23, P. 345-378

[DUANE2006] D. Hanselman, “**Brushless Permanent Magnet Motor Desing**”, 2ed Magna Publishing, 2006. Esquema de Ligação MaX6675. Disponível em: <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-temperature-measurements/max6675-temp-module-arduino-manual-and-tutorial/> Acesso em 10 out. 2016

[ESTMAN1989] E. Miller T. Jonh. “**Brushless Permanent – Magnet and Reluctance Motor Drivess**”. Oxford Science Publications – Clarendon Press, 1989. Fluke. **Manual do usuário do termômetro por Infravermelho, modelo VT02.** Disponível em: <http://assets.fluke.com/manuals/VT0204A_umpor0200.pdf> Acesso em 02 out. 2016

[GIERAS2004] G. Jacek F.; WANG, Rong J. and KAMPER, Maarten J., “**Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**”. 1st ed. Springer – Kluwer – Dordrecht – Boston – London, 2004.

[HALBACH1980] H. Klaus. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. **Nuclear instruments and methods**, v. 169, n. 1, p. 1-10, 1980.

[HALLIDAY2012] H. D., RESNICK, R., WALKER, J., “**Fundamentos da Física**”, Livros Técnicos e Científicos Editora, Volumes 2-3, 9a Edição, Rio de Janeiro, 2012.

[HENNIKOV1941] H. A. Solution of problems in elasticity by the frame work method // *Journal of Applied Mechanics*, 1941, Vol. 8, P. 169-175.

[HUGENS1987] H. Thomas J.R. The finite element Method linear Static and dynamic Finite element. Library of Congress Catalog in Publication Data 2000. Reprint Originally published: Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1987.

[IBTISSAM2014] I., Bouloukza, MOURAD, Mordjaoui, AMMAR, Medoued & FOUZI, Guerboussa. Magnetic Field Analysis of Halbach Permanent Magnetic Synchronous Machine. International Conference on Control, Engineering & Information Technology, 2014.

[JOHN1973] J. Mallison, “One-sided fluxes – A magnetic curiosity.” **IEEE Transactions on magnetics**, vol. 9, no 4, pp 678-682, Dec. 1973,

[KIRSCHVINK1992] K. Joseph L., “**Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems: Improved techniques for the design of bioelectromagnetic experiments**”, *Bioelectromagnetics*, Volume 13, Nº 5, pp 401-411, Jan 1992.

[KNOEPFEL2000] K. Heinz E. “**Magnetic Fields**”, John Wiley & Sons Inc., 2000.

[KRAUS1973] K. John D., CARVER, Keith R., “**Eletromagnetismo**”, 2ª Ed., Guanabara Dois, 1973. Labview.National Instruments. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>> Acesso em 02 out. 2016

[LOTTI2006] L. R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E.T.; LANDRE JR., J. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *Maringá*, v. 11, n. 2, p. 35-43, mar./abril 2006.

[MALLISON1973] M. John. “One-sided fluxes – A magnetic curiosity.” **IEEE Transactions on magnetics**, vol. 9, no 4, pp 678-682, Dec. 1973.

[MANSSON2015] M. Daniel. On the Optimization of Halbach Arrays as Energy Storage Media. *Progress In Electromagnetics Research B.*, vol. 62, 277 – 288, 2015.

[MERRITT1994] Merritt, B.T., Post, R.F., Dreifuerst, G.R., and Bender, D.A. Halbach array motor/generators: A novel generalized electric machine. United States: N. p., 1995. Web. doi:10.2172/88777..

[O'MALLEY1992] O. J. “**Análise de Circuitos**”, 2ª Ed. São Paulo: Makron Books, 1992.

[RUWER2015] R. SHERVIS G. Projeto Eletromagnético de um motor síncrono com ímãs permanentes para aplicação espacial em rodas de reação de satélites. Publicado por: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2015.

[SALCAS2016], **Indústria de Equipamentos de Controle de Processos Industriais**. Disponível em: <<http://www.salcas.com.br/novidades/o-que-e-um-termopar>> Acesso em 02 out. 2016

[SANTIAGO2010] S. J. and BERNCHOFF H. “**Comparison Between Axial and radial flux PM coreless machines for flywheel e energy Storage**”, J. Electrical Systems, 6-2, 2010.

[SANTOS2015] S. OTÁVIO W. P. Comparação entre Motor de Indução e Motor de Ímãs Permanentes. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil 2015.

[SUNI2009], J.C.P. **Sobre a Determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos para Estudos de Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos**, jul. 2009.

[TECÉM2016]. **Empresa de Consultoria, Assessoria, Avaliação e Diagnóstico em Gestão da Manutenção e Gestão Empresarial**. Disponível em:<http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2015/02/EL11-MOTORES-ELETRICOS-Classe-de-Isolamento_Regime-de-Servico-e-Classe-de-Protecao.pdf> Acesso em 02 out. 2016

[TURNER1956] T. M. J., Clough R. W., Martin H. C. and Topp L. J. Stiffness and deflection analysis of complex structures // Journal of Aeronautical Science, 1956, Vol. 23, No. 9, P. 805-824.

[WEG2016]. **Guia de especificação técnica de Motores Elétricos**. Disponível em:<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>> Acesso em 04 out. 2016

[WINTER2012] W. Oliver; KRAL, Christian; SCHMIDT, Erich. Design study of magnet shapes for axial Halbach arrays using 3D finite element analyses. In: **Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on**. IEEE, 2012. p. 2660-2665.

APÊNDICE 1

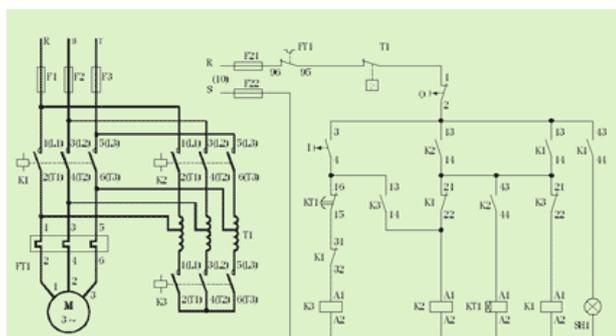
A1. Projeto do Termômetro eletrônico com sensor

1.1.METODOLOGIA

Na calibração do sensor de temperatura de trabalho do gerador foi montada uma partida trifásica utilizando uma chave compensadora como o esquema da figura 61.

A tensão na chave compensadora é reduzida através de um autotransformador trifásico que possui geralmente taps de 50%, 65 % e 80% da tensão nominal.

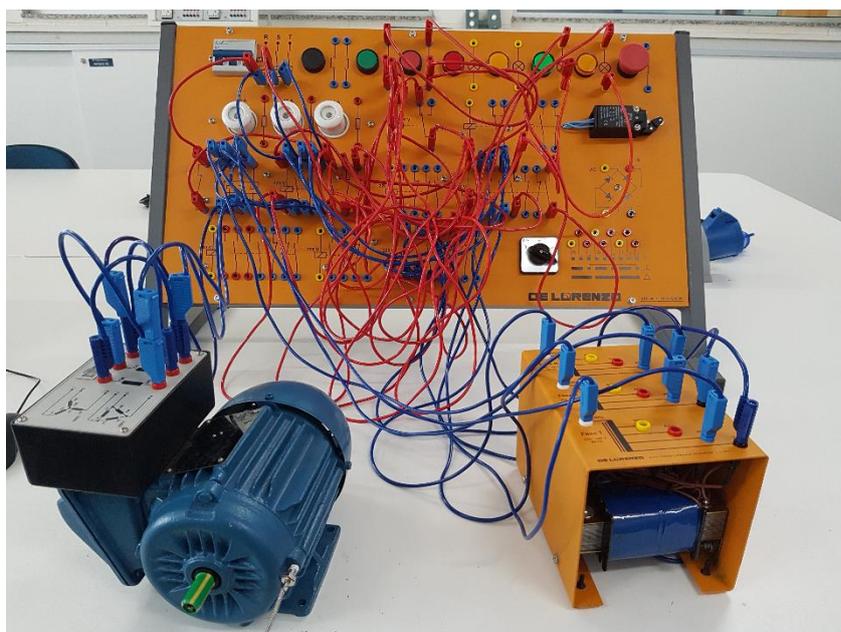
Figura 61 – Esquema Chave Compensadora



Fonte: [Bombasul2016]

Foi montado de acordo com o esquema acima e apoiado por uma estrutura didática de botoeiras, relés de sobrecarga, disjuntores e contadores da De Lorenzo obtendo-se a figura 62.

Figura 62 – Montagem do painel de partida com chave compensadora – De Lorenzo

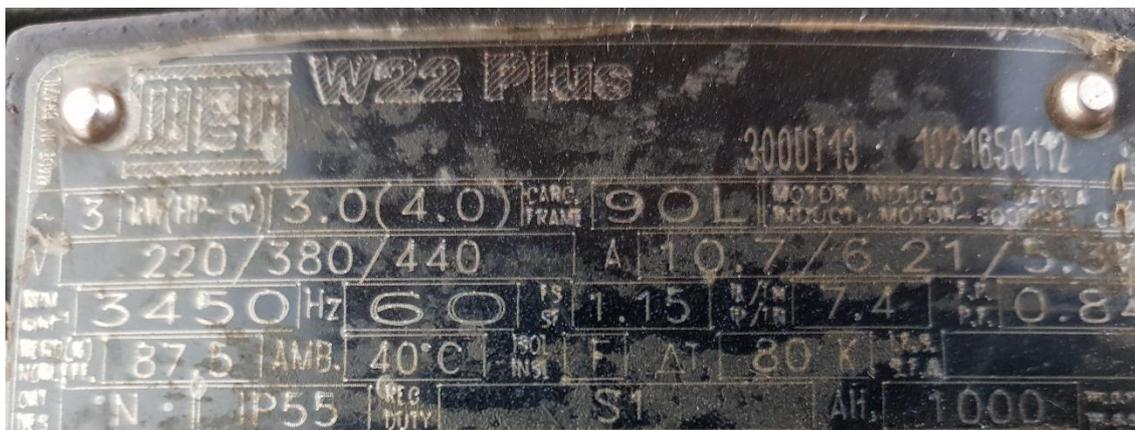


Fonte: [Arquivo do autor]

Montado o esquema com um motor trifásico da WEG de 3kW ou 0,25 cv, cuja faixa de temperatura de funcionamento é de 40°C, como pode ser observado nos dados de placa na figura 63.

Pode-se observar nos dados de placa as correntes nominais à plena carga, porém todas as análises foram feitas com o rotor à vazio, para o acompanhamento da temperatura.

Figura 63 – Dados de placa do motor – WEG

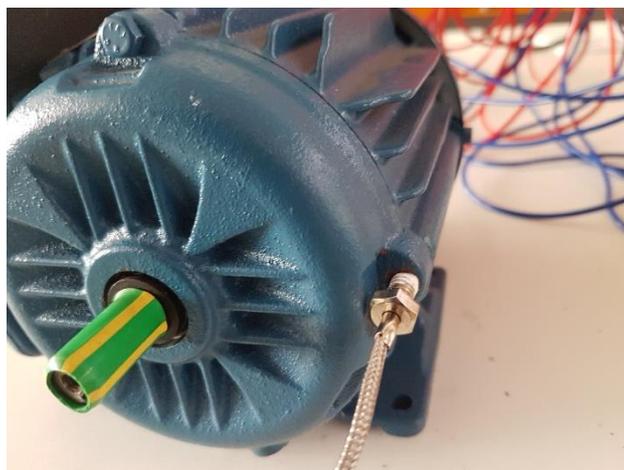


Fonte: [Arquivo do autor]

Para a determinação da temperatura foi utilizado um Termopar tipo K, conectado a um motor elétrico.

A conexão foi feita retirando-se um dos parafusos da carcaça do motor e parafusando o termopar. Para uma boa interação entre o termopar e a estrutura do motor foi utilizado uma pasta térmica, como pode ser observado na figura 64.

Figura 64 – Contato entre o Termopar e o Motor



Fonte: [Arquivo do autor]

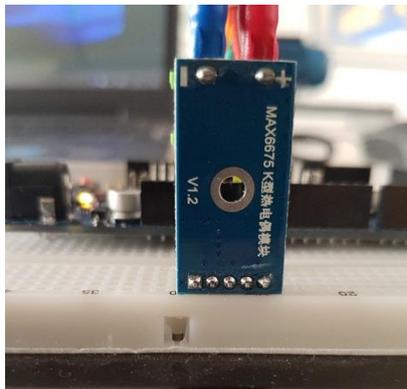
O motor irá trabalhar em regime intermitente periódico com partidas, onde a sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a vazio e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos, para que se atinja o equilíbrio térmico [Tecem2016].

O termopar tipo K está conectado a um módulo Max 6675, mostrado na figura 65.

O termopar conectado ao circuito MAX6675 consegue obter de maneira instantânea as temperaturas do motor entre 0 e 1024°C [Catálogo,2016].

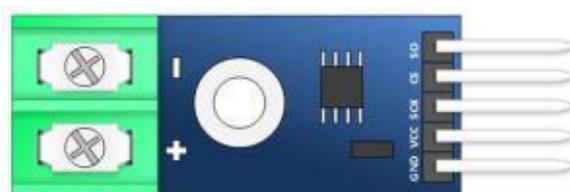
O circuito MAX6675 trabalha em tensão de alimentação 5,0V contínuo com esquema de ligação como mostrado na figura 66.

Figura 65 – Circuito MAX6675



Fonte: [Arquivo do autor]

Figura 66 – Esquema de ligação do circuito MAX6675



Fonte: [Esquema]

O circuito apresenta os seguintes bornes de conexão:

SO: Saída serial do módulo. O arduino lê este borne.

CS: Seleção de Chip. Configuração baixa, seleciona o Módulo e diz-lhe para fornecer uma saída que sincroniza com o clock.

SCK: Clock serial que vem o sinal do Arduino

VCC: 5V tensão de alimentação

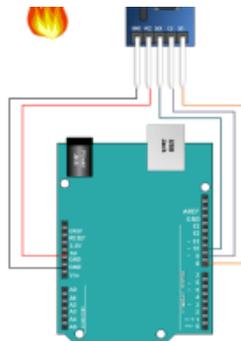
GND: Ground.

- (or Minus): Pólo negativo do termopar tipo K.

+ (or Plus): Pólo positivo do termopar tipo K.

Este chip foi conectado com um módulo de Arduino Due Arm R3, como mostrado na figura 67.

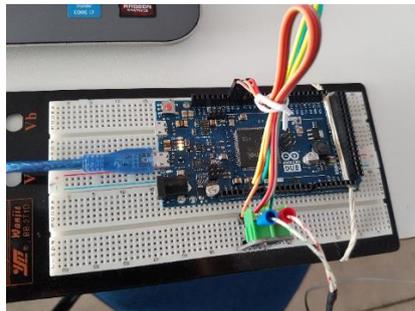
Figura 67– Esquema de ligação



Fonte: [Esquema]

A ligação entre o módulo MAX6675 e a interligação como o Arduino pode ser observado na figura 68.

Figura 68 – Interligação MAX6675 - arduino



Fonte: [Arquivo do autor]

O módulo do Arduino fará conexão com um computador através cabo Usb, no qual estará ligado o sistema Labview para a leitura e processamento de informações.

Antes de estabelecer as leituras através do sistema do Labview foi testado, utilizando a própria plataforma do Arduino em linguagem C++ para a verificação do recebimento de informações do Termopar para o computador, obtendo-se o algoritmo abaixo.

```
// Constantes globais
#define PN_SCK 10
#define PN_SO 9
#define PN_CS 8
// -----
// Rotina de inicialização do MCU
void setup() {
  pinMode(PN_CS, OUTPUT);
  pinMode(PN_SO, INPUT);
}
```

```

pinMode(PN_SCK, OUTPUT);
digitalWrite(PN_CS, HIGH);
  Serial.begin(9600);
}
// -----
// Rotina de leitura do MAX6675

float LerMAX_CELSIUS(){

  // declarações de variáveis
  uint16_t value = 0;
  uint8_t error_tc = 0;
  float temp = 0.0;

  // Ativar MAX em modo de leitura
  digitalWrite(PN_CS , LOW);
  delay(2);
  digitalWrite(PN_CS,HIGH);
  delay(220);
  digitalWrite(PN_CS,LOW);

  /* Ciclo do clock */

  digitalWrite(PN_SCK,HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(PN_SCK,LOW);

  /* Leitura do bits do MAX6675 para a Temperatura. Loop para cada bit lido, e
  gravação em 'temp'
  */

  for (int i=11; i>=0; i--) {
    digitalWrite(PN_SCK,HIGH);
    value += digitalRead(PN_SO) << i;
    digitalWrite(PN_SCK,LOW);
  }

  /* Leitura de TC Input para checagem de erros em TC Errors */

  digitalWrite(PN_SCK,HIGH);
  error_tc = digitalRead(PN_SO);
  digitalWrite(PN_SCK,LOW);
  for (int i=1; i>=0; i--) {
    digitalWrite(PN_SCK,HIGH);
    delay(1);
    digitalWrite(PN_SCK,LOW);
  }

  // Destivar dispositivo
  digitalWrite(PN_CS, HIGH);

```

```

/* conversão para 0,25 da 'temp'
*/
temp = (value*0.25);

/* Se a saída for negative em CS_pin se houver um TC error, retorna 'temp' */
if(error_tc != 0) {
    return -1;
} else {
    return temp;
}
}
// -----
// Rotina de execução principal do MCU
void loop() {
    Serial.println(LerMAX_CELSIUS());
    delay(100);
}
// -----

```

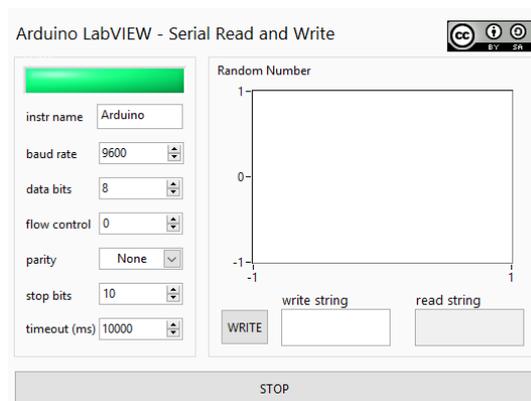
Como consequência do sucesso com o algoritmo do Arduino obteve-se a ligação com o Labview que requisita duas ligações.

A primeira será o reconhecimento do Arduino cujo algoritmo é mostrado no Anexo 1.

O segundo algoritmo está na leitura dos dados do Arduino que foi mostrado no Anexo 2.

A figura 69 mostra o painel de obtenção das curvas de temperatura durante os processos intermitentes de acionamento do motor.

Figura 69 – Painel no Labview



Fonte: [Arquivo do autor]

Procedeu-se assim todas as leituras de temperaturas do motor em regime transitório.

Para a verificação da leitura dos gráficos e constatação da veracidade dos valores, utilizou-se uma leitura externa utilizando um Termômetro de infravermelho da marca Fluke.

O Visual IR Thermometers combina medição de temperatura de ponto central com imagem digital mesclada e sobreposição do mapa de aquecimento [Fluke2016].

1.2.RESULTADO

Iniciou-se as medições sempre que a partida fazia a comutação para a chave compensadora.

Em vários intervalos de tempo eram feitas as leituras com o equipamento de Infravermelho e observações nas curvas de estabilidade do Labview.

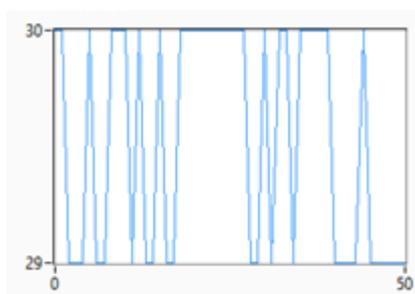
Nas figuras 70 e 71 são observados o comportamento das temperaturas, no infravermelho e no Labview, respectivamente, nos instantes iniciais de medição.

Figura 70 – Leitura do Infravermelho



Fonte: Arquivo do autor

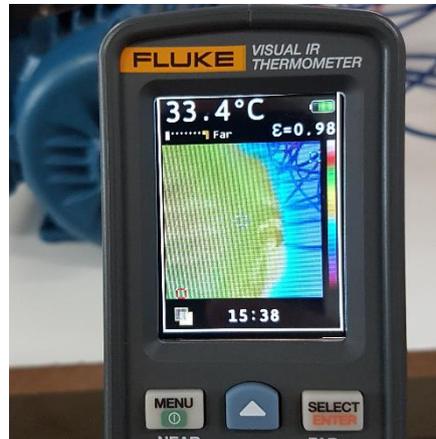
Figura 71 – Gráfico de Temperatura do Labview



Fonte: Arquivo do autor

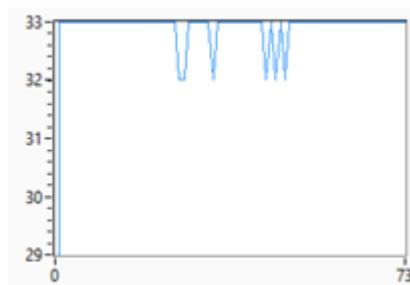
Apesar de funcionamento à vazio, o motor teve aumento de temperatura em intervalo de tempo pequeno, como pode ser observado através das figuras 72 e 73, no equipamento e Labview, respectivamente.

Figura 72 – Leitura do Infravermelho



Fonte: [Arquivo do autor]

Figura 73 – Gráfico de Temperatura do Labview



Fonte: [Arquivo do autor]

Progressivamente a temperatura continuou crescendo e estabilizou em valores de dados de placa, como pode ser observado nas figuras 74 e 75, respectivamente no equipamento de infravermelho e no Labview.

É importante destacar que foram feitos diversos acionamentos e aguardou-se até que o relé de tempo fizesse a comutação para a chave compensadora na partida do motor.

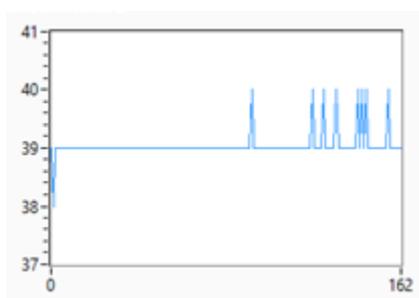
Os intervalos de acionamento foram intermitentes, pois o resfriamento do motor era muito lento devido ao local de trabalho.

Figura 74 – Leitura do Infravermelho



Fonte: [Arquivo do autor]

Figura 75 – Gráfico de Temperatura do Labview



Fonte: [Arquivo do autor]

Realizado 3 medidas em tempos diferentes para ambos os equipamentos, obteve-se a tabela 1, no anexo 3, com as temperaturas.

A tabela 33 retrata os valores médios de cada medida, para cada equipamento.

Tabela 33 – Média da Temperaturas

TEMPERATURAS (°C)			
	MÉDIA t_1	MÉDIA t_2	MÉDIA t_3
INFRAV.	29 ± 2	33 ± 2	40 ± 2
TERMOP.	29 ± 2	32 ± 2	39 ± 2

Fonte: Arquivo do autor

Dois pontos podem ser destacados na leitura pelo equipamento. Primeiro o fator de permissividade do infravermelho foi fixado em 0,98, estabelecido pelo fabricante, devido ao fato do motor ter a carcaça pintada, o que dificulta um pouco a leitura.

No segundo ponto a leitura apresentará alguns erros pela distância do posicionamento do equipamento e o acerto do alvo do infravermelho.

Apesar do termopar estar em contato diretamente com o motor, os erros de leitura poderiam ser provocados devido a indutâncias entre o motor e o cabeamento de ligação com o microprocessador MAX6675, no entanto foram observados praticamente os mesmos valores em todos os instantes de leitura dos equipamentos.

Uma dificuldade de leitura com o algoritmo do Labview foi o acumulo de informações no gráfico, o que necessitou da interrupção e reinicialização do programa, porém as medições foram imediatas deixando o próprio componente estabelecer os intervalos da escala de temperatura.

APÊNDICE 2

2. Projeto da bobina de Helmholtz

2.1. INTRODUÇÃO

A disposição de um par paralelo de bobinas circulares idênticas, separadas por uma distância exatamente igual ao seu raio, cada uma contendo um número N de espiras, de modo que a corrente flua através de ambas as bobinas e no mesmo sentido, foi idealizado há mais de um século pelo físico alemão Hermann von Helmholtz e denomina-se Bobinas de Helmholtz. Este enrolamento resulta em um campo magnético extremamente uniforme na região central entre as bobinas [HALLIDAY, RESNICK E WALKER2012].

O objetivo desse arranjo é permitir que cientistas e engenheiros realizem experimentos e testes que exigem um campo magnético constante em um ambiente conhecido. A geração de campo de Helmholtz pode ser estática, com variação de tempo DC ou AC, dependendo da aplicação.

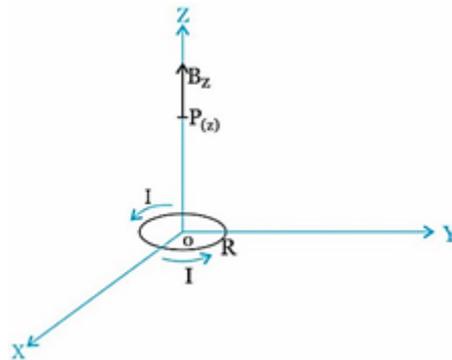
Neste trabalho serão apresentadas as equações resultantes para definir os parâmetros do projeto, a construção de dois módulos (um enrolador de bobinas e um suporte para estabilizá-las paralelamente), o arranjo experimental para obtenção dos valores do campo magnético utilizando um sensor de efeito Hall e a simulação teórica no programa *Comsol Multiphysics* para compará-la com os testes realizados.

2.2. SISTEMA DE BOBINAS HELMHOLTZ

Conforme demonstrado na figura 76, Kraus, Carver (1973) e Carter (1967) afirmam na equação (35) que o campo magnético em um ponto P no eixo de uma espira circular de raio R , percorrida por uma corrente I , à distância z da mesma, é:

$$B_z = \frac{\mu_0 I \cdot R^2}{2 \cdot (z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (35)$$

Figura 76 - Campo magnético de uma corrente I na espira de raio R em um ponto no seu eixo



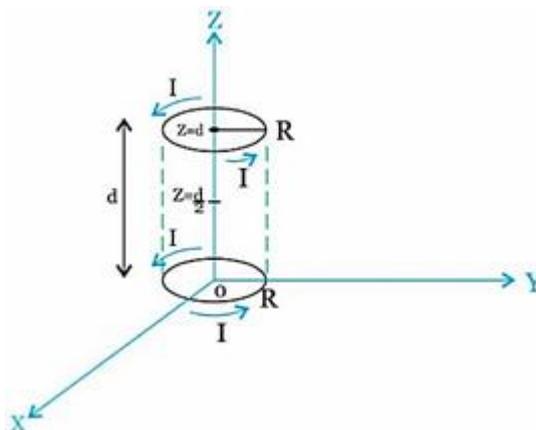
Fonte: [Arquivo do autor]

Para se ter um campo magnético uniforme em uma região do espaço, utiliza-se um par de espiras separadas por uma distância $z=d$ como na figura 77, ambas percorridas por uma corrente de mesma intensidade I . O campo magnético resultante ao longo do eixo Z é dado pelo princípio da superposição, segundo Kraus e Carver (1973) evidenciam na equação (36):

$$B_z = \frac{\mu_0 I \cdot R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{(Z^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{[(Z-d)^2 + R^2]^{3/2}} \right\}, \quad (36)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo. No SI seu valor é $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Figura 77 - Bobina de Helmholtz formada por duas espiras separadas por uma distância d e percorrida por uma corrente I .



Fonte: [Arquivo do autor]

Derivando a equação (37), tem-se:

$$\frac{\partial B_3}{\partial z} = \frac{3\mu_0 I \cdot R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{-Z}{(Z^2 + R^2)^{5/2}} - \frac{(Z - d)}{[(Z - d)^2 + R^2]^{5/2}} \right\} \quad (37)$$

a qual se anula em $Z = \frac{d}{2}$ que representa um máximo de B_3 .

$$\frac{\partial B_3}{\partial z} = 0 \text{ em } Z = \frac{d}{2}.$$

A derivada segunda da equação (37) é:

$$\frac{\partial^2 B_3}{\partial z^2} = \frac{3\mu_0 I \cdot R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{5Z^2}{(Z^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{(Z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{5(Z - d)^2}{[(Z - d)^2 + R^2]^{7/2}} \right\} \quad (38)$$

Se $d=R$, a equação (38) se anula em $Z = \frac{d}{2}$, coordenada em Z que representa o ponto médio entre os eixos das bobinas, resultando um campo magnético uniforme máximo no centro do sistema que constitui o arranjo de Helmholtz.

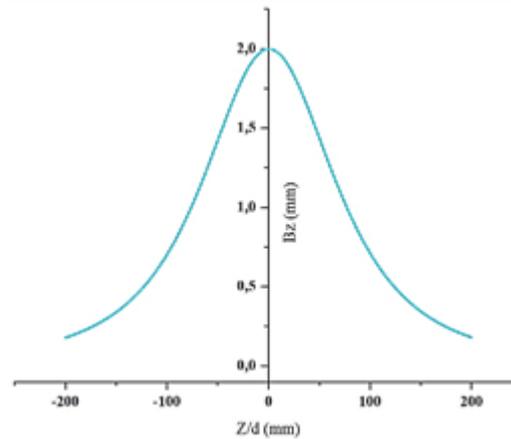
A figura 78 mostra o campo magnético das bobinas em função de $\frac{z}{d}$, apresentando máximo em $Z = \frac{d}{2}$.

Segundo Knoepfel (2000), o campo magnético B no centro do sistema é:

$$B = \frac{8,9917 \cdot 10^{-7} \cdot N \cdot I}{R}, \quad (39)$$

em que N é o número de espiras, I a intensidade de corrente em *ampere* e, R é o raio da espira em *metro*.

Figura 78 - Gráfico do campo magnético das espiras de Helmholtz apresentando valor máximo na região central entre as espiras.



2.3. PARÂMETROS DE PROJETO E ARRANJO EXPERIMENTAL

O campo magnético resultante no eixo das bobinas de Helmholtz, é a soma das contribuições dos campos produzidos pelas espiras individuais, os quais são função do número de espiras N e da corrente circulante I . A intensidade de corrente é limitada pela geração de calor por efeito *Joule* que, por sua vez, depende da secção transversal, do comprimento e da natureza do material do fio.

Para o cobre de resistividade $\rho_r = 1,6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, densidade média $\rho_m = 8960 \text{ kg/m}^3$ e diâmetro da seção circular igual $D = 1,024 \text{ mm}$, a massa de um comprimento l de fio é dada pela equação abaixo.

$$m = \rho_m \cdot l \cdot A \quad (40)$$

A área da seção sendo $A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$ fica: $\rho_m \cdot l \cdot \frac{\pi}{4} D^2$

A potência gerada pela passagem da corrente I é dada por: $P = m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{t}$, com $\frac{\Delta T}{t}$ a taxa de acréscimo de temperatura na unidade de tempo.

De acordo com Boylestad (2004), em função da resistência R do fio e da corrente I , a potência se expressa por: $P = R \cdot I^2$. Igualando as duas expressões de P temos a seguinte equação:

$$m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{t} = R \cdot I^2 \quad (41)$$

Através de manipulações matemáticas, ela pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{R \cdot I^2}{m \cdot c} = \frac{\rho_r \cdot \frac{\ell}{A} \cdot I^2}{\rho_m \cdot \ell \cdot A \cdot c} = \frac{\rho_r \cdot I^2}{\rho_m \cdot c \cdot A^2} \quad (42)$$

resultando que:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{\rho_r \cdot I^2}{c \cdot \rho_m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} \quad (43)$$

onde:

$$I = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(\frac{\Delta T \cdot c \cdot \rho_m}{\rho_r} \right)^{1/2} \quad (44)$$

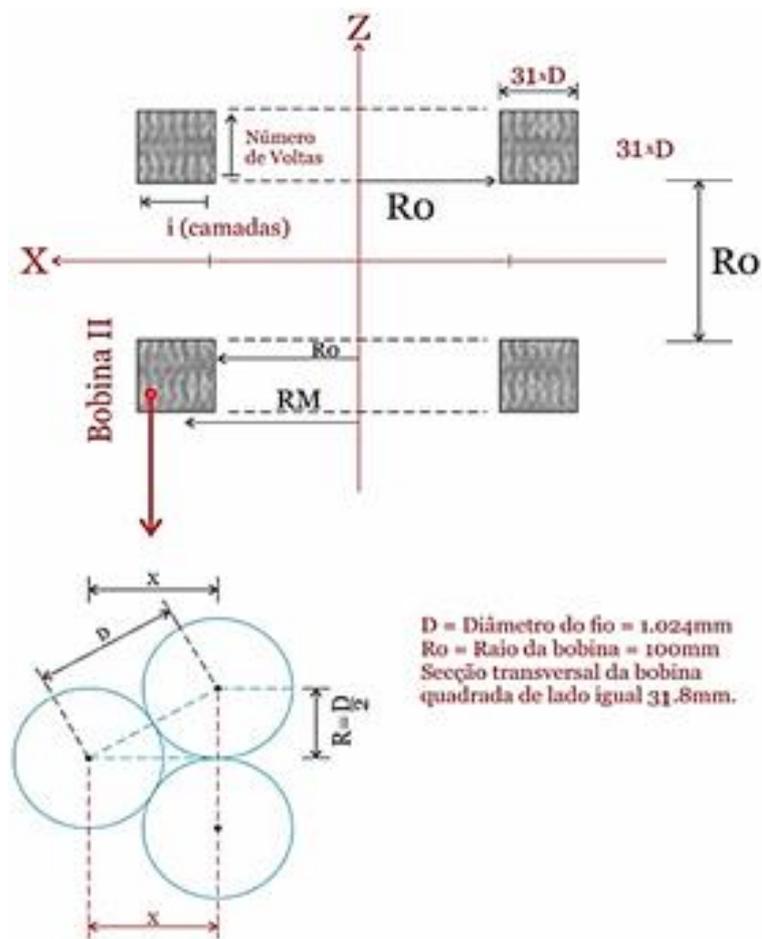
Com os valores numéricos adotados e a taxa de acréscimo de temperatura igual a 0,27 K/s, aplica-se a equação (41) resultando em uma corrente $I = 2,5A$.

Para o cálculo da intensidade de campo magnético gerado no centro, pode ser usada a equação (39). Se adotar um valor de $B_3 = 0,0216T$ com as bobinas de raio 0,10m, resulta o número de espiras igual a 961.

Bronaugh (1995) e Kirschvink (1992) destacam que a forma geométrica da seção transversal da bobina tem sido estudada para diversas aplicações, sendo a de seção quadrada a que apresenta o campo magnético mais homogêneo.

A figura 79 mostra a seção transversal das bobinas de Helmholtz, com o eixo z comum às duas bobinas e o número de voltas igual a 961, compondo 31 camadas com igual número de espiras em cada uma.

Figura 79 - Arranjo das bobinas, com as suas seções transversais e eixo comum Z .



Fonte: [Arquivo do autor]

2.4.CONSTRUÇÃO E EXECUÇÃO DO PROJETO

O módulo enrolador de bobinas (figura 80) foi construído de modo a atender os parâmetros definidos pelo projeto, como diâmetro, seção e número de voltas. Consiste em um equipamento todo feito de madeira, com três discos maciços dispostos de maneira similar a um carretel. O disco central delimita o diâmetro interno e espessura das bobinas e os dois discos laterais possuem um diâmetro maior para delimitar a altura e largura do enrolamento.

Para fazer o acionamento do enrolador utilizou-se uma manivela acoplada a um eixo conectado ao centro dos discos e em duas bases que estabilizavam a estrutura.

Figura 80 - Módulo enrolador de bobinas.



Fonte: [Arquivo do autor]

Com as bobinas enroladas e compactadas, realizou-se testes para identificar se apresentavam as mesmas dimensões, uma vez que medidas iguais implicam em bobinas com melhor rendimento e uniformidade do campo magnético entre elas. A execução dos testes foi dada por meio da Segunda Lei de Ohm [O'MALLEY1992], demonstrada na equação a seguir:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} \quad (45)$$

Em que R é a resistência elétrica do condutor, ρ a resistividade do material, ℓ o comprimento e A a área de seção transversal do condutor.

O teste consiste em medir a resistência elétrica das bobinas utilizando um ohmímetro de precisão e compará-las. Caso apresentassem o mesmo valor de resistência, os seus comprimentos também seriam iguais, já que as bobinas são feitas de mesmo material e possuem resistividade e áreas de mesmo valor.

Ao fazer as medições em ambas bobinas, os valores de suas resistências diferiam de forma consideravelmente pequena, portanto, com a equação 45, foi possível descobrir o comprimento excedente da bobina que apresentava a maior resistência e removê-lo, obtendo as mesmas características elétricas em ambas bobinas.

Após os procedimentos de enrolamento e testes começou-se o processo de montagem dos suportes das bobinas. Novamente, todo material utilizado foi de madeira, uma vez que a estrutura não pode ser composta de material ferromagnético.

A estrutura consiste em estreitas placas de madeira encaixadas entre si, envolvendo as bobinas, semelhante à um quadrado. Com os suportes prontos, a fixação das bobinas por meio de abraçadeiras as deixam imóveis e bem compactas. A figura 81 mostra a estrutura finalizada prontas para o encaixe das bobinas.

Figura 81 - Suporte das bobinas.



Fonte: [Arquivo do autor]

2.5. FUNCIONAMENTO E TESTES DO EQUIPAMENTO

Neste arranjo é muito importante o sentido das correntes elétricas em cada uma das bobinas. A corrente elétrica percorrida em cada uma das bobinas deve ser tal que o campo magnético provocado por cada uma delas se some no centro do arranjo, entre as bobinas. Uma inversão no sentido de uma das correntes elétricas poderá anular o campo magnético a ser medido. Portanto, a ligação deve ser feita conectando o terminal exterior da bobina 1 com o terminal interior da bobina 2, formando uma ligação em série entre elas. Isso faz com que a corrente elétrica flua em um mesmo sentido nas duas bobinas gerando um campo magnético também de mesmo sentido. Com os terminais conectados, as bobinas podem ser acionadas por uma fonte de corrente contínua ligada nos terminais restantes.

Por meio de uma fonte reguladora de tensão alternada variável (modelo TDGC2-1 1 KVA 220VCA) e de uma ponte retificadora de potência (modelo KBPC-5010 50A/1000V), foi possível obter uma fonte regulável de tensão para ligar o equipamento e colocá-lo em funcionamento, como visto na figura 82.

Figura 82 - Fonte de tensão conectada ao equipamento.



Fonte: [Arquivo do autor]

No arranjo experimental as bobinas foram dispostas em distâncias de 5 a 15 cm de espaçamento, realizando testes a cada centímetro em que eram afastadas e aplicando uma corrente de intensidade de 2,5A. Com a utilização de um gaussímetro modelo HT20 Tesla Meter, foi medida a densidade de fluxo magnético na região central movimentando-se a sonda a cada centímetro utilizando uma fita métrica posicionada no centro entre as bobinas, como mostra a figura 83.

Figura 83 - Testes e medições das bobinas.



Fonte: [Arquivo do autor]

Os dados coletados com a realização dos testes foram lançados no *OriginLab*, software utilizado para análise de dados e gráficos científicos. Em cada medição realizada, ajustou-se a curva gaussiana, que indica o ponto máximo de densidade de fluxo magnético. Analisando todos os dados gerados, verificou-se que o espaçamento de 7 cm (tabela 34) entre as bobinas apresentou a maior densidade de fluxo magnético constante em comparação com os outros espaçamentos.

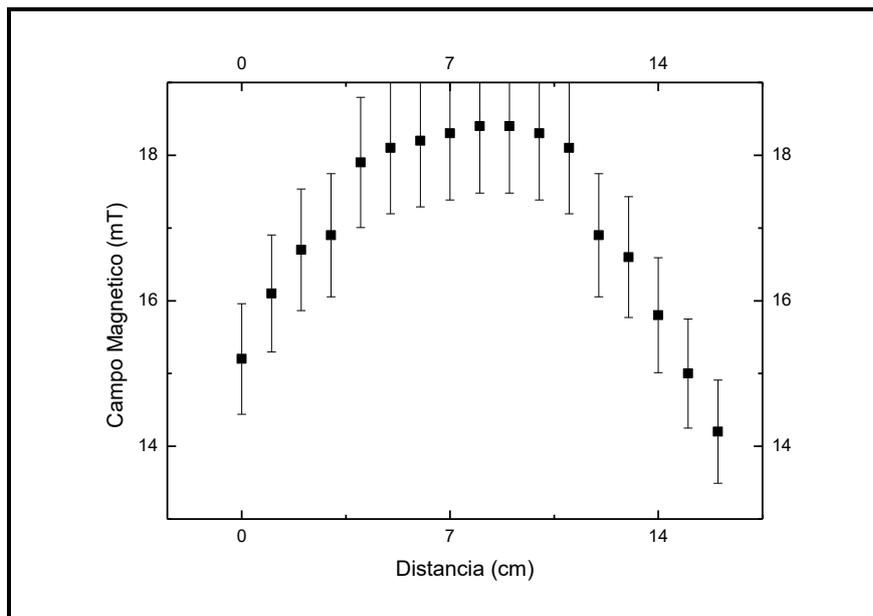
Tabela 34 - Densidade de fluxo magnético para 7 cm.

Eixo X (cm)	Densidade de fluxo magnético (mT)
0	15,2 ± 1
1	16,1 ± 1
2	16,7 ± 1
3	16,9 ± 1
4	17,9 ± 1
5	18,1 ± 1
6	18,2 ± 1
7	18,3 ± 1
8	18,4 ± 1
9	18,4 ± 1
10	18,3 ± 1
11	18,1 ± 1
12	16,9 ± 1
13	16,6 ± 1
14	15,8 ± 1
15	15,0 ± 1
16	14,2 ± 1

Fonte: Arquivo do autor

Os dados da tabela 34 foram utilizados para projeção do gráfico em curva gaussiana. A figura 84 demonstra este resultado e apresenta uma máxima densidade de fluxo magnético em 18,4 mT.

Figura 84 – Densidade de fluxo magnético 7 cm de distância entre as bobinas



Fonte: [Arquivo do autor]

A divergência da distância definida no projeto (10 cm) com a distância obtida nos testes e medições (7 cm), ocorreu devido à construção rudimentar do arranjo das bobinas. O uso do fio de cobre de seção circular, o enrolamento desordenado e o diferente número de espiras são alguns dos fatores que ocasionam perdas e, por fim, apresentam um relevante impacto na eficiência do campo magnético proveniente entre as bobinas.

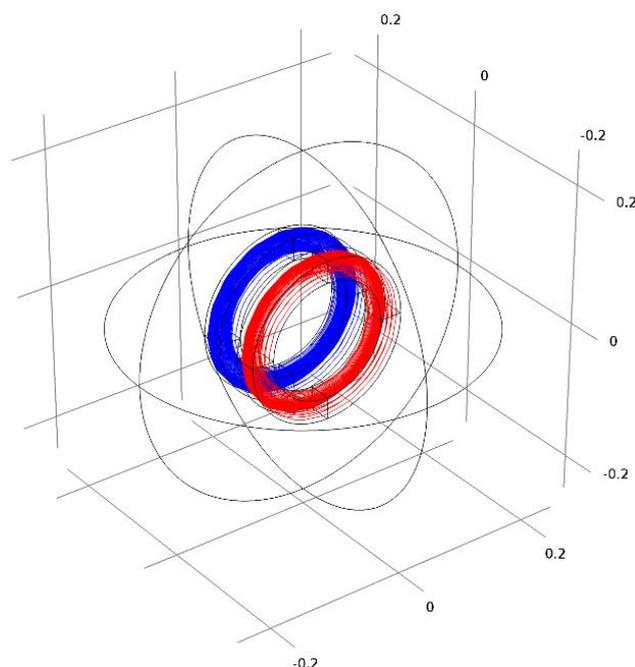
Além das deficiências citadas, o desalinhamento das estruturas e bobinas também causam a variação do campo magnético entre elas. A utilização de fio de seção quadrada e equipamentos mais precisos para fazer o enrolamento e alinhamento da estrutura, garantem um melhor desempenho na construção do projeto.

2.6. SIMULAÇÃO NO PROGRAMA COMSOL

O COMSOL *Multiphysics* é um software com ambiente interativo, fundamentado em métodos numéricos de resolução para modelagem e simulação de variáveis físicas de diversas áreas. Nele é possível simular, de uma só vez, modelos de múltiplos fenômenos físicos. Essa plataforma é uma combinação de módulos distintos e ferramentas capazes de simular aplicações eletromagnéticas, mecânicas, vazões de fluídos e químicas.

E foi o COMSOL *Multiphysics* versão 5.2a, o software usado para simular o arranjo experimental. Com o objetivo de conferir a distribuição da uniformidade do campo magnético fornecido pelo sistema das Bobinas de Helmholtz, a geometria computacional do protótipo foi desenhada no COMSOL, com os mesmos dados aplicados no arranjo experimental, como pode ser verificado na figura 85. Para modelagem das bobinas, utilizou-se a interface de campos magnéticos 3D incorporada, disponível no módulo AC/DC, aplicando 961 fios em cada e uma corrente elétrica de intensidade 2,5A.

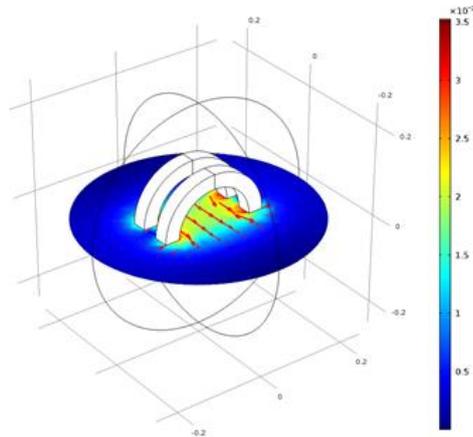
Figura 85 - Modelagem das Bobinas de Helmholtz.



Fonte: [COMSOL *Multiphysics*]

A densidade de fluxo magnético gerada no centro das bobinas pôde ser analisada a partir da simulação feita em 3D, para fins de comparação com os resultados obtidos no arranjo experimental, aplicando uma corrente elétrica de intensidade 2,5A e espaçamento de 7 cm entre as bobinas (figura 86).

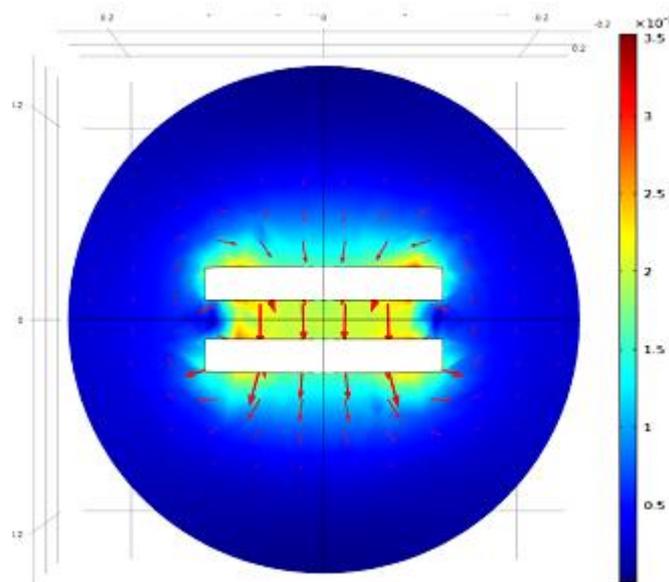
Figura 86 - Densidade de fluxo magnético entre as duas bobinas - simulação em 3D



Fonte: [Arquivo do autor]

Para evidenciar a densidade de fluxo magnético gerado entre as bobinas, a figura 87 apresenta uma visão 2D demonstrando a intensidade de 19,8mT no centro entre elas. As setas vermelhas simulam a força e o sentido do campo magnético e, como os resultados indicam, a densidade de fluxo magnético é relativamente uniforme no centro entre as duas bobinas, exceto pela região próxima às bordas das bobinas. O campo magnético uniforme é o resultado da soma dos dois componentes de campo paralelos ao eixo das bobinas.

Figura 87 - Visão 2D da densidade de fluxo magnético entre as bobinas.



Fonte: [Arquivo do autor]

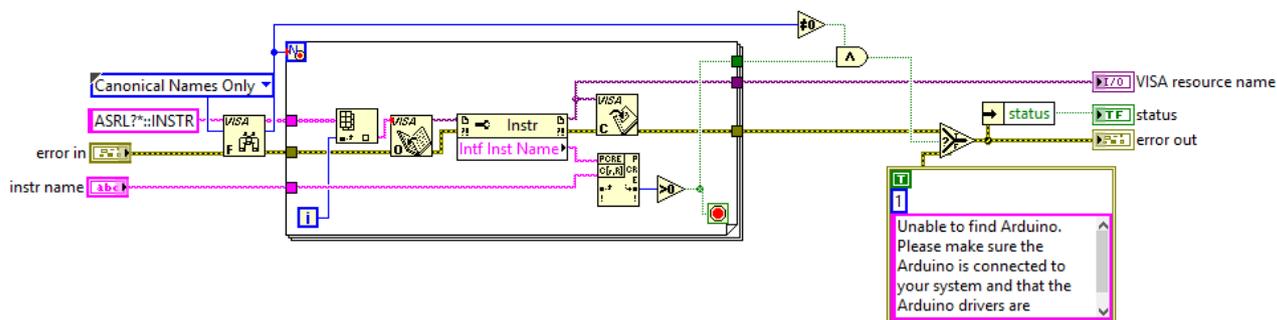
Pode ser observada uma breve similaridade nos resultados encontrados quando se compara os testes realizados e a simulação gráfica, obtendo, respectivamente, 18,4mT e 19,8mT.

E os resultados do arranjo experimental e da simulação das bobinas de Helmholtz mostram que elas podem ser usadas para calibração de sensores Hall.

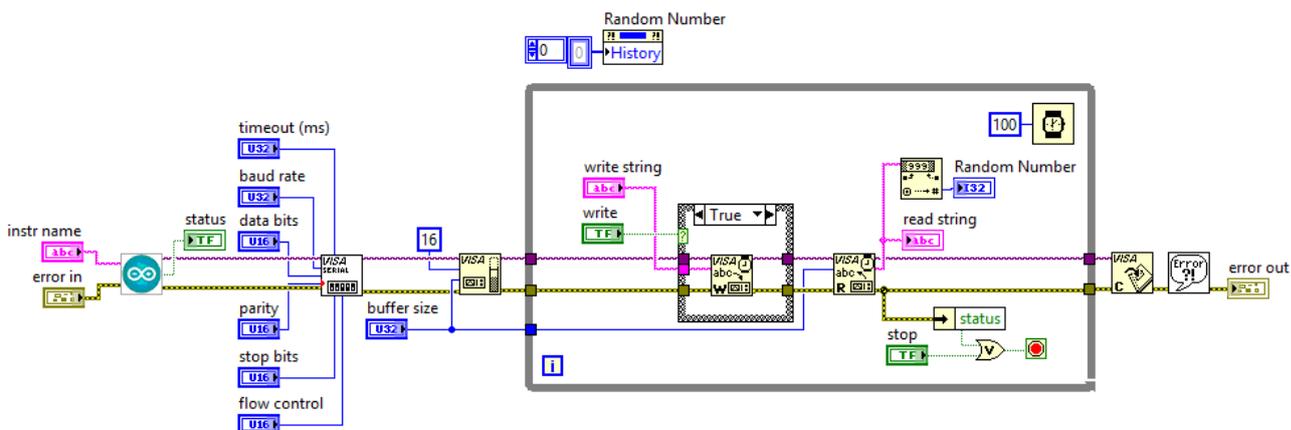
8. ANEXOS

Todos os Anexos são do Arquivo Pessoal do autor.

Anexo 1: Reconhecimento do Arduino no Labview



Anexo 2: Algoritmo de leitura dos dados



Anexo 3 – Medidas das Temperaturas dos Equipamentos

TEMPERATURAS (°C) todos com erro de ±0,1					
t ₁ = 3 min.	MÉDIA	t ₂ = 10 min.	MÉDIA	t ₃ = 20 min.	MÉDIA

				t ₁				t ₂				t ₃
INFRAV.	29±2	29±2	29±2	29±2	33±2	33±2	33±2	33±2	40±2	40±2	40±2	40±2
TERMOP.	29±2	30±2	29±2	29±2	33±2	32±2	33±2	33±2	40±2	39±2	40±2	39±2

Fonte: Arquivo do autor

Anexo 4 – Diâmetro Médio Interno de cada Bobina do Estator 1

BOBINA	MEDIDO (mm)		MÉDIA (mm)
1	9,2 ±0,1	9,4 ±0,1	9,3 ±0,2
2	8,8 ±0,1	9,1 ±0,1	9,0 ±0,2
3	8,9 ±0,1	9,0 ±0,1	9,0 ±0,2
4	9,1 ±0,1	9,3 ±0,1	9,2 ±0,2
5	8,3 ±0,1	8,7 ±0,1	8,5 ±0,2
6	9,1 ±0,1	9,6 ±0,1	9,4 ±0,2
7	9,3 ±0,1	9,3 ±0,1	9,3 ±0,2
8	9,3 ±0,1	9,3 ±0,1	9,3 ±0,2
9	9,3 ±0,1	9,6 ±0,1	9,5 ±0,2
10	9,7 ±0,1	9,4 ±0,1	9,6 ±0,2
11	9,4 ±0,1	8,9 ±0,1	9,2 ±0,2
12	8,9 ±0,1	9,3 ±0,1	9,1 ±0,2

Anexo 5 – Diâmetro Médio Interno de cada Bobina do Estator 2

BOBINA	MEDIDO(mm)		MÉDIA (mm)
1	9,1 ±0,1	9,5 ±0,1	9,3 ±0,2
2	9,1 ±0,1	9,2 ±0,1	9,2 ±0,2
3	9,5 ±0,1	8,7 ±0,1	9,1 ±0,2
4	9,3 ±0,1	9,4 ±0,1	9,4 ±0,2
5	9,3 ±0,1	9,6 ±0,1	9,5 ±0,2
6	9,4 ±0,1	9,8 ±0,1	9,6 ±0,2
7	9,4 ±0,1	9,6 ±0,1	9,5 ±0,2
8	9,1 ±0,1	9,4 ±0,1	9,3 ±0,2
9	9,1 ±0,1	9,4 ±0,1	9,3 ±0,2
10	9,7 ±0,1	9,9 ±0,1	9,8 ±0,2
11	9,8 ±0,1	9,9 ±0,1	9,9 ±0,2
12	9,6 ±0,1	9,7 ±0,1	9,7 ±0,2

Anexo 6 – Diâmetro Médio Externo de cada Bobina por Estator 1

BOBINA	MEDIDO (mm)		MÉDIA (mm)
1	26,5 ±0,1	27,2 ±0,1	26,9 ±0,2
2	27,2 ±0,1	27,3 ±0,1	27,3 ±0,2
3	26,0 ±0,1	27,6 ±0,1	26,8 ±0,2
4	25,3 ±0,1	25,7 ±0,1	25,5 ±0,2
5	25,7 ±0,1	25,6 ±0,1	25,7 ±0,2
6	26,0 ±0,1	26,6 ±0,1	26,3 ±0,2
7	26,2 ±0,1	25,4 ±0,1	25,8 ±0,2
8	25,9 ±0,1	25,5 ±0,1	25,7 ±0,2
9	26,7 ±0,1	25,2 ±0,1	26,0 ±0,2
10	24,7 ±0,1	24,6 ±0,1	24,7 ±0,2
11	24,8 ±0,1	27,7 ±0,1	26,3 ±0,2
12	26,7 ±0,1	26,8 ±0,1	26,8 ±0,2

Anexo 7 – Diâmetro Médio Externo de cada Bobina por Estator 2

BOBINA	MEDIDO (mm)		MÉDIA (mm)
1	27,3 ±0,1	27,6 ±0,1	27,5 ±0,2
2	24,4 ±0,1	25,4 ±0,1	24,9 ±0,2
3	25,3 ±0,1	26,4 ±0,1	25,9 ±0,2
4	26,0 ±0,1	26,2 ±0,1	26,1 ±0,2
5	27,8 ±0,1	27,3 ±0,1	27,6 ±0,2
6	25,5 ±0,1	26,0 ±0,1	25,8 ±0,2
7	25,9 ±0,1	27,5 ±0,1	26,7 ±0,2
8	25,6 ±0,1	25,1 ±0,1	25,4 ±0,2
9	26,3 ±0,1	26,0 ±0,1	26,2 ±0,2
10	24,8 ±0,1	25,0 ±0,1	24,9 ±0,2
11	26,7 ±0,1	24,7 ±0,1	25,7 ±0,2
12	27,4 ±0,1	26,8 ±0,1	27,1 ±0,2

Anexo 8 – Resistência de cada Bobina do Estator 1

BOBINA	R(mΩ)
1	127,7 ±0,1
2	134,0 ±0,1
3	129,0 ±0,1
4	129,6 ±0,1
5	127,2 ±0,1
6	122,7 ±0,1
7	128,2 ±0,1
8	129,6 ±0,1
9	129,4 ±0,1
10	130,2 ±0,1
11	130,3 ±0,1
12	129,7 ±0,1

Anexo 9– Resistência de cada Bobina do Estator 2

BOBINA	R(mΩ)
1	126,4 ±0,1
2	122,0 ±0,1
3	129,1 ±0,1
4	129,7 ±0,1
5	132,9 ±0,1
6	127,7 ±0,1
7	127,6 ±0,1
8	129,9 ±0,1
9	132,1 ±0,1
10	129,6 ±0,1
11	129,7 ±0,1
12	130,6 ±0,1

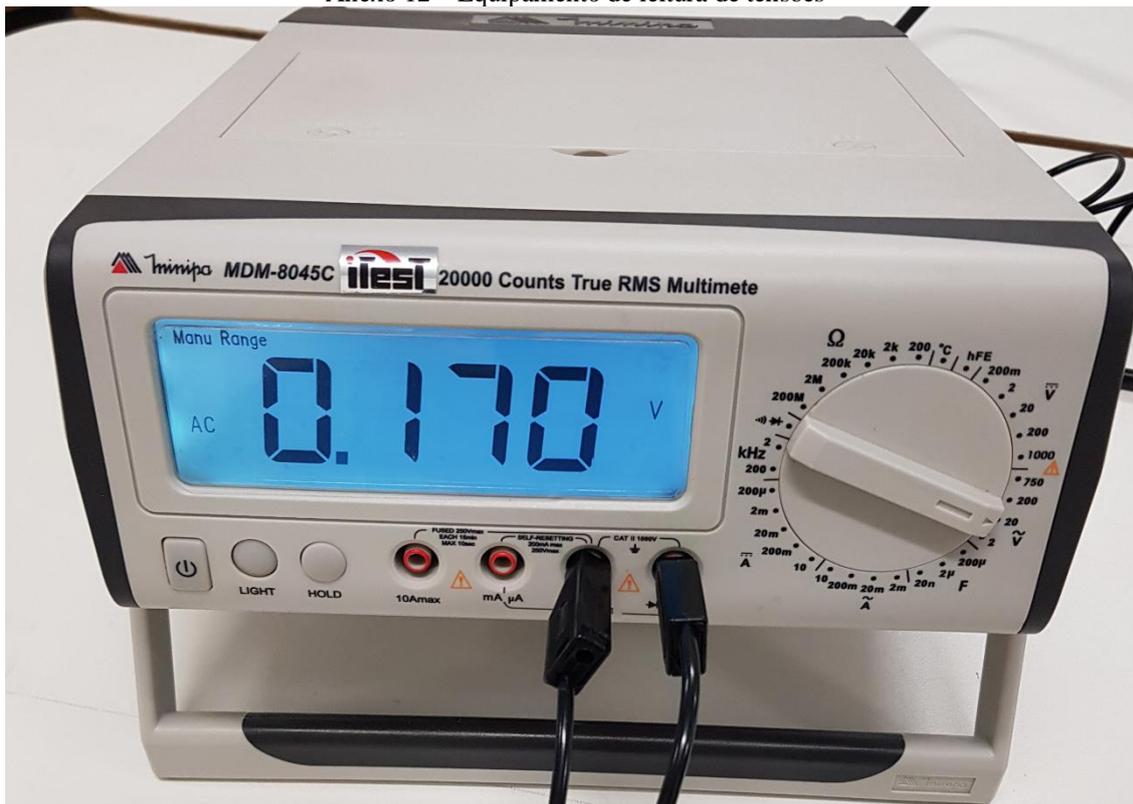
Anexo 10– Tabela de Tensões Sem Carga do Estator 1 Com Sistema em Estrela (Y)

ROTAÇÕES	Φ_1 (V)	Φ_2 (V)	Φ_3 (V)
(rpm)	(12A - 1B)	(12A - 2B)	(1B - 2B)
103 ±1	0,40 ±0,01	0,56 ±0,01	0,47 ±0,01
200 ±1	0,82 ±0,01	1,12 ±0,01	0,95 ±0,01
304 ±1	1,31 ±0,01	1,78 ±0,01	1,48 ±0,01
407 ±1	1,79 ±0,01	2,40 ±0,01	1,99 ±0,01
500 ±1	2,21 ±0,01	2,98 ±0,01	2,46 ±0,01
605 ±1	2,70 ±0,01	3,61 ±0,01	2,98 ±0,01
702 ±1	3,14 ±0,01	4,20 ±0,01	3,46 ±0,01
800 ±1	3,59 ±0,01	4,80 ±0,01	3,95 ±0,01
902 ±1	4,06 ±0,01	5,41 ±0,01	4,45 ±0,01
1001 ±1	4,56 ±0,01	6,00 ±0,01	4,94 ±0,01
1106 ±1	5,04 ±0,01	6,69 ±0,01	5,46 ±0,01
1203 ±1	5,44 ±0,01	7,20 ±0,01	5,92 ±0,01

Anexo 11 – Tabela de Tensões Sem Carga do Estator 2 Com Sistema em Estrela (Y)

ROTAÇÕES	Φ_1 (V)	Φ_2 (V)	Φ_3 (V)
(rpm)	(12A - 10A)	(10A - 5A)	(5A -12A)
102 ±1	0,72 ±0,01	0,71 ±0,01	0,68 ±0,01
205 ±1	1,53 ±0,01	1,51 ±0,01	1,44 ±0,01
303 ±1	2,30 ±0,01	2,27 ±0,01	2,17 ±0,01
404 ±1	3,08 ±0,01	3,06 ±0,01	2,92 ±0,01
500 ±1	3,83 ±0,01	3,79 ±0,01	3,63 ±0,01
601 ±1	4,62 ±0,01	4,58 ±0,01	4,37 ±0,01
702 ±1	5,40 ±0,01	5,35 ±0,01	5,12 ±0,01
802 ±1	6,18 ±0,01	6,12 ±0,01	5,86 ±0,01
903 ±1	6,95 ±0,01	6,89 ±0,01	6,59 ±0,01
1002 ±1	7,74 ±0,01	7,66 ±0,01	7,33 ±0,01
1103 ±1	8,51 ±0,01	8,42 ±0,01	8,08 ±0,01
1206 ±1	9,32 ±0,01	9,23 ±0,01	8,84 ±0,01

Anexo 12 – Equipamento de leitura de tensões



Anexo 13– Tabela de Tensões e Correntes Com Carga do Estator 1 Com Sistema em Estrela (Y)

RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(12A - 1B)		(12A - 2B)		(1B - 2B)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1	0,066 ±0,001	0,030 ±0,001	0,090 ±0,001	0,040 ±0,001	0,068 ±0,001	0,033 ±0,001
200 ±1	0,130 ±0,001	0,061 ±0,001	0,180 ±0,001	0,079 ±0,001	0,145 ±0,001	0,066 ±0,001
303 ±1	0,199 ±0,001	0,094 ±0,001	0,274 ±0,001	0,121 ±0,001	0,219 ±0,001	0,102 ±0,001
401 ±1	0,265 ±0,001	0,126 ±0,001	0,365 ±0,001	0,160 ±0,001	0,289 ±0,001	0,135 ±0,001
500 ±1	0,334 ±0,001	0,159 ±0,001	0,464 ±0,001	0,207 ±0,001	0,360 ±0,001	0,167 ±0,001
603 ±1	0,405 ±0,001	0,193 ±0,001	0,560 ±0,001	0,250 ±0,001	0,431 ±0,001	0,201 ±0,001
700 ±1	0,474 ±0,001	0,227 ±0,001	0,655 ±0,001	0,293 ±0,001	0,498 ±0,001	0,23 ±0,001
802 ±1	0,544 ±0,001	0,261 ±0,001	0,751 ±0,001	0,337 ±0,001	0,572 ±0,001	0,27 ±0,001
900 ±1	0,617 ±0,001	0,296 ±0,001	0,847 ±0,001	0,381 ±0,001	0,646 ±0,001	0,302 ±0,001
1000 ±1	0,669 ±0,001	0,321 ±0,001	4,140 ±0,001	1,980 ±0,001	0,665 ±0,001	0,305 ±0,001
1100 ±1	0,726 ±0,001	0,348 ±0,001	4,510 ±0,001	2,160 ±0,001	0,719 ±0,001	0,336 ±0,001
1210±1	0,805 ±0,001	0,388 ±0,001	4,940 ±0,001	2,350 ±0,001	0,789 ±0,001	0,369 ±0,001

Anexo 14 – Tabela de Tensões e Correntes Com Carga do Estator 2 Com Sistema em Estrela (Y)

RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÃO S (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(12A - 10A)		(10A - 5A)		(5A - 12A)	
	TENSÃO	CORRENT E	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
103 ±1	0,100 ±0,001	0,050 ±0,001	0,120 ±0,001	0,055 ±0,001	0,110 ±0,001	0,053 ±0,001
201 ±1	0,210 ±0,001	0,099 ±0,001	0,238 ±0,001	0,106 ±0,001	0,220 ±0,001	0,104 ±0,001
304 ±1	0,326 ±0,001	0,155 ±0,001	0,350 ±0,001	0,156 ±0,001	0,335 ±0,001	0,158 ±0,001
400 ±1	0,442 ±0,001	0,211 ±0,001	0,463 ±0,001	0,203 ±0,001	0,440 ±0,001	0,208 ±0,001
502 ±1	0,561 ±0,001	0,268 ±0,001	0,589 ±0,001	0,258 ±0,001	0,553 ±0,001	0,262 ±0,001
600 ±1	0,674 ±0,001	0,323 ±0,001	0,713 ±0,001	0,317 ±0,001	0,661 ±0,001	0,313 ±0,001
703 ±1	0,796 ±0,001	0,381 ±0,001	0,826 ±0,001	0,369 ±0,001	0,773 ±0,001	0,370 ±0,001
804 ±1	3,400 ±0,001	1,700 ±0,001	3,380 ±0,001	1,620 ±0,001	3,210 ±0,001	1,580 ±0,001
900 ±1	3,800 ±0,001	1,900 ±0,001	3,790 ±0,001	1,80 ±0,001	3,570 ±0,001	1,750 ±0,001
1005 ±1	4,220 ±0,001	2,090 ±0,001	4,200 ±0,001	2,00 ±0,001	3,950 ±0,001	1,940 ±0,001
1103 ±1	4,600 ±0,001	2,280 ±0,001	4,590 ±0,001	2,18 ±0,001	4,320 ±0,001	2,120 ±0,001
1205 ±1	5,000 ±0,001	2,48 ±0,001	4,990 ±0,001	2,37 ±0,001	4,600 ±0,001	2,300 ±0,001

Anexo 15 – Tabela de Tensões e Correntes Com Carga do Estator 1 Com Sistema em Triângulo (Δ)

RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(10A/2B - 1B/3B)		(10A/2B - 5B/12A)		(1B/3B - 5B/12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1	0,033 ±0,001	0,014 ±0,001	0,028 ±0,001	0,008 ±0,001	0,054 ±0,001	0,002 ±0,001
202 ±1	0,068 ±0,001	0,030 ±0,001	0,047 ±0,001	0,018 ±0,001	0,102 ±0,001	0,047 ±0,001
301 ±1	0,096 ±0,001	0,043 ±0,001	0,066 ±0,001	0,026 ±0,001	0,152 ±0,001	0,071 ±0,001
401 ±1	0,130 ±0,001	0,059 ±0,001	0,085 ±0,001	0,036 ±0,001	0,202 ±0,001	0,095 ±0,001
500 ±1	0,160 ±0,001	0,074 ±0,001	0,107 ±0,001	0,044 ±0,001	0,252 ±0,001	0,119 ±0,001
603 ±1	0,192 ±0,001	0,089 ±0,001	0,126 ±0,001	0,054 ±0,001	0,303 ±0,001	0,143 ±0,001
701 ±1	0,222 ±0,001	0,104 ±0,001	0,147 ±0,001	0,062 ±0,001	0,354 ±0,001	0,166 ±0,001
802 ±1	0,256 ±0,001	0,119 ±0,001	0,164 ±0,001	0,071 ±0,001	0,405 ±0,001	0,190 ±0,001
901 ±1	0,289 ±0,001	0,135 ±0,001	0,183 ±0,001	0,080 ±0,001	0,455 ±0,001	0,213 ±0,001
1003 ±1	0,321 ±0,001	0,150 ±0,001	0,203 ±0,001	0,089 ±0,001	0,504 ±0,001	0,237 ±0,001
1102 ±1	0,355 ±0,001	0,166 ±0,001	0,223 ±0,001	0,097 ±0,001	0,553 ±0,001	0,259 ±0,001
1202 ±1	0,387 ±0,001	0,182 ±0,001	0,243 ±0,001	0,106 ±0,001	0,603 ±0,001	0,283 ±0,001

Anexo 16 – Tabela de Tensões e Correntes Com Carga do Estator 2 Com Sistema em Triângulo (Δ)

RESISTOR	R₁=2,21 Ω		R₂=2,25 Ω		R₃=2,23 Ω	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(2A/10A - 1B/3B)		(2A/10A - 5A/12A)		(1B/3B - 5A/12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
103 \pm 1	0,060 \pm 0,001	0,028 \pm 0,001	0,051 \pm 0,001	0,020 \pm 0,001	0,034 \pm 0,001	0,012 \pm 0,001
201 \pm 1	0,120 \pm 0,001	0,055 \pm 0,001	0,108 \pm 0,001	0,042 \pm 0,001	0,048 \pm 0,001	0,023 \pm 0,001
300 \pm 1	0,179 \pm 0,001	0,083 \pm 0,001	0,160 \pm 0,001	0,072 \pm 0,001	0,080 \pm 0,001	0,035 \pm 0,001
400 \pm 1	0,239 \pm 0,001	0,112 \pm 0,001	0,228 \pm 0,001	0,097 \pm 0,001	0,103 \pm 0,001	0,047 \pm 0,001
503 \pm 1	0,301 \pm 0,001	0,142 \pm 0,001	0,291 \pm 0,001	0,128 \pm 0,001	0,126 \pm 0,001	0,059 \pm 0,001
603 \pm 1	0,359 \pm 0,001	0,169 \pm 0,001	0,367 \pm 0,001	0,162 \pm 0,001	0,148 \pm 0,001	0,070 \pm 0,001
703 \pm 1	0,417 \pm 0,001	0,197 \pm 0,001	0,429 \pm 0,001	0,190 \pm 0,001	0,172 \pm 0,001	0,082 \pm 0,001
804 \pm 1	0,479 \pm 0,001	0,227 \pm 0,001	0,502 \pm 0,001	0,215 \pm 0,001	0,194 \pm 0,001	0,094 \pm 0,001
900 \pm 1	0,539 \pm 0,001	0,256 \pm 0,001	0,564 \pm 0,001	0,251 \pm 0,001	0,218 \pm 0,001	0,106 \pm 0,001
1005 \pm 1	0,602 \pm 0,001	0,287 \pm 0,001	0,626 \pm 0,001	0,279 \pm 0,001	0,242 \pm 0,001	0,118 \pm 0,001
1103 \pm 1	0,660 \pm 0,001	0,315 \pm 0,001	0,688 \pm 0,001	0,306 \pm 0,001	0,265 \pm 0,001	0,129 \pm 0,001
1205 \pm 1	0,722 \pm 0,001	0,345 \pm 0,001	0,749 \pm 0,001	0,329 \pm 0,001	0,287 \pm 0,001	0,139 \pm 0,001

Anexo 17 – Perdas JOULE por Fase para o Estator 1, em Y

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(W)	(W)	(W)
100 \pm 1	0,011 \pm 0,001	0,019 \pm 0,001	0,013 \pm 0,001
200 \pm 1	0,045 \pm 0,001	0,076 \pm 0,001	0,050 \pm 0,001
300 \pm 1	0,106 \pm 0,001	0,177 \pm 0,001	0,120 \pm 0,001
400 \pm 1	0,190 \pm 0,001	0,310 \pm 0,001	0,210 \pm 0,001
500 \pm 1	0,303 \pm 0,001	0,519 \pm 0,001	0,321 \pm 0,001
600 \pm 1	0,447 \pm 0,001	0,757 \pm 0,001	0,465 \pm 0,001
700 \pm 1	0,618 \pm 0,001	1,040 \pm 0,001	0,630 \pm 0,001
800 \pm 1	0,817 \pm 0,001	1,376 \pm 0,001	0,814 \pm 0,001
900 \pm 1	1,051 \pm 0,001	1,759 \pm 0,001	1,050 \pm 0,001
1000 \pm 1	1,236 \pm 0,001	47,505 \pm 0,001	1,071 \pm 0,001
1100 \pm 1	1,453 \pm 0,001	56,535 \pm 0,001	1,299 \pm 0,001
1200 \pm 1	1,806 \pm 0,001	66,919 \pm 0,001	1,567 \pm 0,001

Anexo 18 – Perdas JOULE por Fase para o Estator 2, em Y

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(W)	(W)	(W)
100 ±1	0,010 ±0,001	0,019 ±0,001	0,013 ±0,001
200 ±1	0,043 ±0,001	0,074 ±0,001	0,052 ±0,001
300 ±1	0,103 ±0,001	0,174 ±0,001	0,124 ±0,001
400 ±1	0,185 ±0,001	0,304 ±0,001	0,218 ±0,001
500 ±1	0,294 ±0,001	0,508 ±0,001	0,334 ±0,001
600 ±1	0,433 ±0,001	0,741 ±0,001	0,483 ±0,001
700 ±1	0,599 ±0,001	1,018 ±0,001	0,655 ±0,001
800 ±1	0,792 ±0,001	1,346 ±0,001	0,846 ±0,001
900 ±1	1,019 ±0,001	1,721 ±0,001	1,091 ±0,001
1000 ±1	1,199 ±0,001	46,480 ±0,001	1,113 ±0,001
1100 ±1	1,409 ±0,001	55,315 ±0,001	1,350 ±0,001
1200 ±1	1,751 ±0,001	65,474 ±0,001	1,629 ±0,001

Anexo 19 – Perdas JOULE por Fase para o Estator 1, em Δ

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(W)	(W)	(W)
100 ±1	0,002 ±0,001	0,001 ±0,001	0,0001 ±0,001
200 ±1	0,011 ±0,001	0,004 ±0,001	0,025 ±0,001
300 ±1	0,022 ±0,001	0,008 ±0,001	0,058 ±0,001
400 ±1	0,042 ±0,001	0,016 ±0,001	0,104 ±0,001
500 ±1	0,066 ±0,001	0,023 ±0,001	0,163±0,001
600 ±1	0,095 ±0,001	0,035 ±0,001	0,235 ±0,001
700 ±1	0,130 ±0,001	0,047 ±0,001	0,317 ±0,001
800 ±1	0,170 ±0,001	0,061 ±0,001	0,415 ±0,001
900 ±1	0,219 ±0,001	0,078 ±0,001	0,522 ±0,001
1000 ±1	0,270 ±0,001	0,096 ±0,001	0,646 ±0,001
1100 ±1	0,331 ±0,001	0,114 ±0,001	0,772 ±0,001
1200 ±1	0,397 ±0,001	0,136 ±0,001	0,922 ±0,001

Anexo 20 – Perdas JOULE por Fase para o Estator 2, em Δ

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
O			
Rpm	(W)	(W)	(W)
100 ±1	0,009±0,001	0,005 ±0,001	0,0017 ±0,001
200 ±1	0,035 ±0,001	0,021 ±0,001	0,0063 ±0,001
300 ±1	0,080 ±0,001	0,061 ±0,001	0,0147±0,001
400 ±1	0,146 ±0,001	0,112 ±0,001	0,0264 ±0,001
500 ±1	0,235 ±0,001	0,194 ±0,001	0,0416 ±0,001
600 ±1	0,332 ±0,001	0,311 ±0,001	0,0586 ±0,001
700 ±1	0,451 ±0,001	0,428 ±0,001	0,0804 ±0,001
800 ±1	0,599 ±0,001	0,548 ±0,001	0,1057 ±0,001
900 ±1	0,762 ±0,001	0,747 ±0,001	0,1344 ±0,001
1000 ±1	0,958 ±0,001	0,923 ±0,001	0,1665 ±0,001
1100 ±1	1,154 ±0,001	1,110 ±0,001	0,1990 ±0,001
1200 ±1	1,384 ±0,001	1,283 ±0,001	0,2311 ±0,001

Anexo 21 – Reatância por Fase para o Estator 1 por rotação

ROTAÇÕES (rpm)	REATÂNCIA		
	FASE 1: $\Phi 1$	FASE 2: $\Phi 2$	FASE 3: $\Phi 3$
	$\mu\Omega$	$\mu\Omega$	$\mu\Omega$
100 ±1	0,64 ±0,01	0,71 ±0,01	0,68 ±0,01
200±1	1,29 ±0,01	1,41 ±0,01	1,35 ±0,01
300 ±1	1,93 ±0,01	2,12 ±0,01	2,03 ±0,01
400 ±1	2,58 ±0,01	2,83 ±0,01	2,71 ±0,01
500 ±1	3,22 ±0,01	3,53 ±0,01	3,39 ±0,01
600 ±1	3,86 ±0,01	4,24 ±0,01	4,06 ±0,01
700 ±1	4,51 ±0,01	4,95 ±0,01	4,74 ±0,01
750 ±1	4,83 ±0,01	5,30 ±0,01	5,08 ±0,01
800 ±1	5,15 ±0,01	5,65 ±0,01	5,42 ±0,01
900 ±1	5,80 ±0,01	6,36 ±0,01	6,10 ±0,01
1000 ±1	6,44 ±0,01	7,06 ±0,01	6,77 ±0,01
1100 ±1	7,09 ±0,01	7,77 ±0,01	7,45 ±0,01
1200 ±1	7,73 ±0,01	8,48 ±0,01	8,13 ±0,01

Anexo 25 – Correntes por Fase para o Estator 1, em Y, por rotação

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(A)	(A)	(A)
100 ±1	0,147 ±0,001	0,203 ±0,001	0,171 ±0,001
200 ±1	0,301 ±0,001	0,405 ±0,001	0,346 ±0,001
300 ±1	0,481 ±0,001	0,644 ±0,001	0,538 ±0,001
400 ±1	0,657 ±0,001	0,868 ±0,001	0,724 ±0,001
500 ±1	0,812 ±0,001	1,078 ±0,001	0,895 ±0,001
600 ±1	0,991 ±0,001	1,306 ±0,001	1,084 ±0,001
700 ±1	1,153 ±0,001	1,519 ±0,001	1,258 ±0,001
800 ±1	1,318 ±0,001	1,736 ±0,001	1,437 ±0,001
900 ±1	1,491 ±0,001	1,957 ±0,001	1,618 ±0,001
1000 ±1	1,674 ±0,001	2,170 ±0,001	1,797 ±0,001
1100 ±1	1,851 ±0,001	2,420 ±0,001	1,986 ±0,001
1200 ±1	1,998 ±0,001	2,604 ±0,001	2,153 ±0,001

Anexo 26 – Correntes por Fase para o Estator 2, em Y, por rotação

ROTAÇÃO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Rpm	(A)	(A)	(A)
100 ±1	0,264 ±0,001	0,256 ±0,001	0,248 ±0,001
200 ±1	0,561 ±0,001	0,545 ±0,001	0,525 ±0,001
300 ±1	0,844 ±0,001	0,819 ±0,001	0,792 ±0,001
400 ±1	1,130 ±0,001	1,104 ±0,001	1,065 ±0,001
500 ±1	1,405 ±0,001	1,368 ±0,001	1,324 ±0,001
600 ±1	1,695 ±0,001	1,653 ±0,001	1,594 ±0,001
700 ±1	1,981 ±0,001	1,931 ±0,001	1,868 ±0,001
800 ±1	2,267 ±0,001	2,209 ±0,001	2,138 ±0,001
900 ±1	2,550 ±0,001	2,486 ±0,001	2,404 ±0,001
1000 ±1	2,840 ±0,001	2,764 ±0,001	2,674 ±0,001
1100 ±1	3,122 ±0,001	3,039 ±0,001	2,948 ±0,001
1200 ±1	3,419 ±0,001	3,331 ±0,001	3,225 ±0,001

Anexo 27 – Potência Trifásica para o Estator 1, em Y, por rotação

ROTAÇÃO	POTÊNCIAS 3 Φ
rpm	(W)
100 ±1	0,253 ±0,001
200 ±1	1,029 ±0,001
300 ±1	2,573 ±0,001
400 ±1	4,700 ±0,001
500 ±1	7,207 ±0,001
600 ±1	10,621 ±0,001
700 ±1	14,355 ±0,001
800 ±1	18,741 ±0,001
900 ±1	23,842 ±0,001
1000 ±1	29,533 ±0,001
1100 ±1	36,360 ±0,001
1200 ±1	42,365 ±0,001

Anexo 28 – Potência Trifásica para o Estator 2, em Y, por rotação

ROTAÇÃO	POTÊNCIAS 3 Φ
Rpm	(W)
100 ±1	0,541 ±0,001
200 ±1	2,438 ±0,001
300 ±1	5,518 ±0,001
400 ±1	9,970 ±0,001
500 ±1	15,373 ±0,001
600 ±1	22,368 ±0,001
700 ±1	30,592 ±0,001
800 ±1	40,057 ±0,001
900 ±1	50,697 ±0,001
1000 ±1	62,756 ±0,001
1100 ±1	75,974 ±0,001
1200 ±1	91,123 ±0,001

Anexo 29 – Tensão e Corrente para o Estator 1, em Y, por rotação, com o Rotor 1

ESTATOR 1						
RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(12A - 1B)		(12A - 2B)		(1B - 2B)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1	0,059 ±0,001	0,028 ±0,001	0,037 ±0,001	0,013 ±0,001	0,038 ±0,001	0,014 ±0,001
200 ±1	0,115 ±0,001	0,054 ±0,001	0,064 ±0,001	0,026 ±0,001	0,062 ±0,001	0,028 ±0,001
300 ±1	0,174±0,001	0,083 ±0,001	0,094 ±0,001	0,040 ±0,001	0,095 ±0,001	0,042 ±0,001
400 ±1	0,236 ±0,001	0,113 ±0,001	0,126 ±0,001	0,054 ±0,001	0,123 ±0,001	0,057 ±0,001
500 ±1	0,292 ±0,001	0,139 ±0,001	0,154 ±0,001	0,066 ±0,001	0,152 ±0,001	0,071 ±0,001
600 ±1	0,352 ±0,001	0,168 ±0,001	0,184 ±0,001	0,080 ±0,001	0,181 ±0,001	0,085 ±0,001
700 ±1	0,410 ±0,001	0,197 ±0,001	0,213 ±0,001	0,093 ±0,001	0,212 ±0,001	0,100 ±0,001
800 ±1	0,473 ±0,001	0,227 ±0,001	0,244 ±0,001	0,107 ±0,001	0,241 ±0,001	0,110 ±0,001
900 ±1	0,535 ±0,001	0,257 ±0,001	0,275 ±0,001	0,121 ±0,001	0,273 ±0,001	0,128 ±0,001
1000 ±1	0,602 ±0,001	0,289 ±0,001	0,308 ±0,001	0,136 ±0,001	0,305 ±0,001	0,144 ±0,001
1100 ±1	0,660 ±0,001	0,316 ±0,001	0,338 ±0,001	0,149 ±0,001	0,334 ±0,001	0,158 ±0,001
1200 ±1	0,714 ±0,001	0,343 ±0,001	0,371 ±0,001	0,163 ±0,001	0,365 ±0,001	0,174 ±0,001

Anexo 30 – Tensão e Corrente para o Estator 2, em Y, por rotação, com o Rotor 1

ESTATOR 2						
RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(12A - 10A)		(10A - 5A)		(5A - 12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1	0,027 ±0,001	0,007 ±0,001	0,020 ±0,001	0,009±0,001	0,031 ±0,001	0,008 ±0,001
200 ±1	0,035 ±0,001	0,013 ±0,001	0,042 ±0,001	0,016 ±0,001	0,034 ±0,001	0,015 ±0,001
300 ±1	0,043 ±0,001	0,020 ±0,001	0,058±0,001	0,023 ±0,001	0,056 ±0,001	0,023 ±0,001
400 ±1	0,061 ±0,001	0,026 ±0,001	0,077 ±0,001	0,032 ±0,001	0,067 ±0,001	0,030 ±0,001
500 ±1	0,070 ±0,001	0,033 ±0,001	0,094 ±0,001	0,039 ±0,001	0,085 ±0,001	0,038 ±0,001
600 ±1	0,088 ±0,001	0,040 ±0,001	0,112 ±0,001	0,047 ±0,001	0,099 ±0,001	0,045 ±0,001
700 ±1	0,099 ±0,001	0,045 ±0,001	0,129 ±0,001	0,055 ±0,001	0,116 ±0,001	0,05 ±0,001
800 ±1	0,115 ±0,001	0,053 ±0,001	0,147 ±0,001	0,063 ±0,001	0,131 ±0,001	0,06 ±0,001
900 ±1	0,127 ±0,001	0,059 ±0,001	0,164 ±0,001	0,070 ±0,001	0,148 ±0,001	0,067 ±0,001
1000 ±1	0,143 ±0,001	0,066 ±0,001	0,182 ±0,001	0,079 ±0,001	0,162 ±0,001	0,075 ±0,001
1100 ±1	0,155 ±0,001	0,072 ±0,001	0,198 ±0,001	0,086 ±0,001	0,178 ±0,001	0,083 ±0,001
1200 ±1	0,171 ±0,001	0,079 ±0,001	0,218 ±0,001	0,095 ±0,001	0,196 ±0,001	0,091 ±0,001

Anexo 31 – Tensão e Corrente para o Estator 1, em Δ , por rotação, com o Rotor 1

ESTATOR 1						
RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(10A/2B - 1B/3B)		(10A/2B - 5B/12A)		(1B/3B - 5B/12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 \pm 1	0,030 \pm 0,001	0,012 \pm 0,001	0,026 \pm 0,001	0,008 \pm 0,001	0,049 \pm 0,001	0,021 \pm 0,001
200 \pm 1	0,059 \pm 0,001	0,025 \pm 0,001	0,045 \pm 0,001	0,016 \pm 0,001	0,087 \pm 0,001	0,040 \pm 0,001
300 \pm 1	0,083 \pm 0,001	0,038 \pm 0,001	0,063 \pm 0,001	0,025 \pm 0,001	0,131 \pm 0,001	0,060 \pm 0,001
400 \pm 1	0,112 \pm 0,001	0,050 \pm 0,001	0,083 \pm 0,001	0,034 \pm 0,001	0,172 \pm 0,001	0,081 \pm 0,001
500 \pm 1	0,137 \pm 0,001	0,063 \pm 0,001	0,098 \pm 0,001	0,042 \pm 0,001	0,216 \pm 0,001	0,100 \pm 0,001
600 \pm 1	0,165 \pm 0,001	0,076 \pm 0,001	0,119 \pm 0,001	0,050 \pm 0,001	0,257 \pm 0,001	0,120 \pm 0,001
700 \pm 1	0,194 \pm 0,001	0,090 \pm 0,001	0,137 \pm 0,001	0,059 \pm 0,001	0,303 \pm 0,001	0,142 \pm 0,001
800 \pm 1	0,225 \pm 0,001	0,105 \pm 0,001	0,157 \pm 0,001	0,067 \pm 0,001	0,346 \pm 0,001	0,162 \pm 0,001
900 \pm 1	0,251 \pm 0,001	0,117 \pm 0,001	0,174 \pm 0,001	0,075 \pm 0,001	0,389 \pm 0,001	0,183 \pm 0,001
1000 \pm 1	0,286 \pm 0,001	0,132 \pm 0,001	0,193 \pm 0,001	0,084 \pm 0,001	0,437 \pm 0,001	0,205 \pm 0,001
1100 \pm 1	0,313 \pm 0,001	0,147 \pm 0,001	0,214 \pm 0,001	0,093 \pm 0,001	0,483 \pm 0,001	0,225 \pm 0,001
1200 \pm 1	0,344 \pm 0,001	0,160 \pm 0,001	0,229 \pm 0,001	0,100 \pm 0,001	0,525 \pm 0,001	0,246 \pm 0,001

Anexo 32 – Tensão e Corrente para o Estator 2, em Δ , por rotação, com o Rotor 1

		ESTATOR 2					
RESISTOR		$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)		Φ_1		Φ_2		Φ_3	
		(2A/10A - 1B/3B)		(2A/10A - 5A/12A)		(1B/3B - 5A/12A)	
		TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
		(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1		0,013 ±0,001	0,004 ±0,001	0,030 ±0,001	0,004 ±0,001	0,018 ±0,001	0,002 ±0,001
200 ±1		0,027 ±0,001	0,008 ±0,001	0,030 ±0,001	0,009 ±0,001	0,019 ±0,001	0,003 ±0,001
300 ±1		0,029 ±0,001	0,011 ±0,001	0,037 ±0,001	0,013 ±0,001	0,021 ±0,001	0,005 ±0,001
400 ±1		0,039 ±0,001	0,015 ±0,001	0,046 ±0,001	0,017 ±0,001	0,023 ±0,001	0,006 ±0,001
500 ±1		0,043 ±0,001	0,019 ±0,001	0,054 ±0,001	0,022 ±0,001	0,027 ±0,001	0,008 ±0,001
600 ±1		0,053 ±0,001	0,023 ±0,001	0,063 ±0,001	0,026 ±0,001	0,029 ±0,001	0,009 ±0,001
700 ±1		0,060 ±0,001	0,027 ±0,001	0,074 ±0,001	0,030 ±0,001	0,031 ±0,001	0,010 ±0,001
800 ±1		0,071 ±0,001	0,031 ±0,001	0,083 ±0,001	0,035 ±0,001	0,032 ±0,001	0,012 ±0,001
900 ±1		0,075 ±0,001	0,035 ±0,001	0,092 ±0,001	0,039 ±0,001	0,035 ±0,001	0,014 ±0,001
1000 ±1		0,086 ±0,001	0,039 ±0,001	0,104 ±0,001	0,043 ±0,001	0,036 ±0,001	0,015 ±0,001
1100 ±1		0,092 ±0,001	0,042 ±0,001	0,112 ±0,001	0,047 ±0,001	0,044 ±0,001	0,016 ±0,001
1200 ±1		0,104 ±0,001	0,046 ±0,001	0,122 ±0,001	0,052 ±0,001	0,044 ±0,001	0,018 ±0,001

Anexo 33 – Tensão e Corrente para o Estator 1, em Y, por rotação, com o Rotor 2

		ESTATOR 1					
RESISTOR		$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)		Φ_1		Φ_2		Φ_3	
		(12A - 1B)		(12A - 2B)		(1B - 2B)	
		TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
		(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1		0,018 ±0,001	0,004 ±0,001	0,007 ±0,001	0,002 ±0,001	0,008 ±0,001	0,002 ±0,001
200 ±1		0,025 ±0,001	0,008 ±0,001	0,017 ±0,001	0,004 ±0,001	0,013 ±0,001	0,004 ±0,001
300 ±1		0,029 ±0,001	0,012 ±0,001	0,023 ±0,001	0,006 ±0,001	0,016 ±0,001	0,007 ±0,001
400 ±1		0,042 ±0,001	0,016 ±0,001	0,024 ±0,001	0,008 ±0,001	0,021 ±0,001	0,009 ±0,001
500 ±1		0,045 ±0,001	0,020 ±0,001	0,025 ±0,001	0,010 ±0,001	0,025 ±0,001	0,011 ±0,001
600 ±1		0,053 ±0,001	0,024 ±0,001	0,030 ±0,001	0,012 ±0,001	0,030 ±0,001	0,013 ±0,001
700 ±1		0,060 ±0,001	0,028 ±0,001	0,035 ±0,001	0,014 ±0,001	0,034 ±0,001	0,02 ±0,001
800 ±1		0,069 ±0,001	0,032 ±0,001	0,039 ±0,001	0,017 ±0,001	0,039 ±0,001	0,02 ±0,001
900 ±1		0,076 ±0,001	0,037 ±0,001	0,044 ±0,001	0,019 ±0,001	0,044 ±0,001	0,020 ±0,001
1000 ±1		0,085 ±0,001	0,040 ±0,001	0,048 ±0,001	0,021 ±0,001	0,047 ±0,001	0,022 ±0,001
1100 ±1		0,093 ±0,001	0,043 ±0,001	0,053 ±0,001	0,023 ±0,001	0,052 ±0,001	0,024 ±0,001
1200 ±1		0,103 ±0,001	0,049 ±0,001	0,058 ±0,001	0,025 ±0,001	0,057 ±0,001	0,027 ±0,001

Anexo 34 – Tensão e Corrente para o Estator 2, em Y, por rotação, com o Rotor 2

ESTATOR 2						
RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1		Φ_2		Φ_3	
	(12A - 10A)		(10A - 5A)		(5A - 12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1	0,081 ±0,001	0,040 ±0,001	0,095 ±0,001	0,004 ±0,001	0,088 ±0,001	0,045 ±0,001
200 ±1	0,173 ±0,001	0,084 ±0,001	0,199 ±0,001	0,089 ±0,001	0,183 ±0,001	0,088 ±0,001
300 ±1	0,262 ±0,001	0,127 ±0,001	0,297 ±0,001	0,134 ±0,001	0,272 ±0,001	0,131 ±0,001
400 ±1	0,359 ±0,001	0,174 ±0,001	0,400 ±0,001	0,180 ±0,001	0,366 ±0,001	0,176 ±0,001
500 ±1	0,456 ±0,001	0,221 ±0,001	0,501 ±0,001	0,226 ±0,001	0,460 ±0,001	0,221 ±0,001
600 ±1	0,550 ±0,001	0,268 ±0,001	0,604 ±0,001	0,273 ±0,001	0,553 ±0,001	0,266 ±0,001
700 ±1	0,650 ±0,001	0,316 ±0,001	0,709 ±0,001	0,321 ±0,001	0,650 ±0,001	0,312 ±0,001
800 ±1	0,739 ±0,001	0,360 ±0,001	0,800 ±0,001	0,364 ±0,001	0,735 ±0,001	0,333 ±0,001
900 ±1	3,580 ±0,001	1,830 ±0,001	3,340 ±0,001	1,65 ±0,001	0,715 ±0,001	0,339 ±0,001
1000 ±1	3,890 ±0,001	2,000 ±0,001	3,740 ±0,001	1,85 ±0,001	0,798 ±0,001	0,378 ±0,001
1100 ±1	3,970 ±0,001	2,000 ±0,001	3,890 ±0,001	1,90 ±0,001	3,560 ±0,001	1,810 ±0,001
1200 ±1	4,300 ±0,001	2,16 ±0,001	4,210 ±0,001	2,04 ±0,001	3,870 ±0,001	1,930 ±0,001

Anexo 35 – Tensão e Corrente para o Estator 1, em Δ , por rotação, com o Rotor 2

ESTATOR 1						
RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1 (V)		Φ_2 (V)		Φ_3 (V)	
	(10A/2B - 1B/3B)		(10A/2B - 5B/12A)		(1B/3B - 5B/12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 ±1	0,006 ±0,001	0,002 ±0,001	0,006 ±0,001	0,002 ±0,001	0,008 ±0,001	0,003 ±0,001
200 ±1	0,010 ±0,001	0,003 ±0,001	0,009 ±0,001	0,003 ±0,001	0,014 ±0,001	0,006 ±0,001
300 ±1	0,012 ±0,001	0,004 ±0,001	0,012 ±0,001	0,004 ±0,001	0,020 ±0,001	0,008 ±0,001
400 ±1	0,015 ±0,001	0,006 ±0,001	0,014 ±0,001	0,005 ±0,001	0,025 ±0,001	0,011 ±0,001
500 ±1	0,018 ±0,001	0,007 ±0,001	0,017 ±0,001	0,006 ±0,001	0,031 ±0,001	0,014 ±0,001
600 ±1	0,021 ±0,001	0,009 ±0,001	0,019 ±0,001	0,007 ±0,001	0,036 ±0,001	0,017 ±0,001
700 ±1	0,023 ±0,001	0,010 ±0,001	0,022 ±0,001	0,009 ±0,001	0,041 ±0,001	0,019 ±0,001
800 ±1	0,026 ±0,001	0,012 ±0,001	0,025 ±0,001	0,010 ±0,001	0,047 ±0,001	0,022 ±0,001
900 ±1	0,029 ±0,001	0,013 ±0,001	0,028 ±0,001	0,011 ±0,001	0,053 ±0,001	0,023 ±0,001
1000 ±1	0,034 ±0,001	0,015 ±0,001	0,030 ±0,001	0,012 ±0,001	0,058 ±0,001	0,027 ±0,001
1100 ±1	0,037 ±0,001	0,017 ±0,001	0,033 ±0,001	0,013 ±0,001	0,063 ±0,001	0,030 ±0,001
1200 ±1	0,041 ±0,001	0,019 ±0,001	0,036 ±0,001	0,015 ±0,001	0,069 ±0,001	0,063 ±0,001

Anexo 36 – Tensão e Corrente para o Estator 2, em Δ , por rotação, com o Rotor 2

ESTATOR 2						
RESISTOR	$R_1=2,21 \Omega$		$R_2=2,25 \Omega$		$R_3=2,23 \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	Φ_1 (V)		Φ_2 (V)		Φ_3 (V)	
	(12A/10A - 1B/3B)		(2A/10A - 5A/12A)		(1B/3B - 5A/12A)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100 \pm 1	0,045 \pm 0,001	0,022 \pm 0,001	0,053 \pm 0,001	0,024 \pm 0,001	0,022 \pm 0,001	0,011 \pm 0,001
200 \pm 1	0,092 \pm 0,001	0,044 \pm 0,001	0,108 \pm 0,001	0,048 \pm 0,001	0,045 \pm 0,001	0,021 \pm 0,001
300 \pm 1	0,141 \pm 0,001	0,067 \pm 0,001	0,166 \pm 0,001	0,074 \pm 0,001	0,067 \pm 0,001	0,032 \pm 0,001
400 \pm 1	0,189 \pm 0,001	0,090 \pm 0,001	0,202 \pm 0,001	0,097 \pm 0,001	0,088 \pm 0,001	0,042 \pm 0,001
500 \pm 1	0,238 \pm 0,001	0,115 \pm 0,001	0,272 \pm 0,001	0,121 \pm 0,001	0,108 \pm 0,001	0,052 \pm 0,001
600 \pm 1	0,288 \pm 0,001	0,139 \pm 0,001	0,326 \pm 0,001	0,145 \pm 0,001	0,129 \pm 0,001	0,062 \pm 0,001
700 \pm 1	0,338 \pm 0,001	0,163 \pm 0,001	0,378 \pm 0,001	0,169 \pm 0,001	0,149 \pm 0,001	0,073 \pm 0,001
800 \pm 1	0,392 \pm 0,001	0,189 \pm 0,001	0,434 \pm 0,001	0,195 \pm 0,001	0,171 \pm 0,001	0,083 \pm 0,001
900 \pm 1	0,448 \pm 0,001	0,217 \pm 0,001	0,490 \pm 0,001	0,220 \pm 0,001	0,192 \pm 0,001	0,093 \pm 0,001
1000 \pm 1	0,504 \pm 0,001	0,243 \pm 0,001	0,545 \pm 0,001	0,245 \pm 0,001	0,213 \pm 0,001	0,104 \pm 0,001
1100 \pm 1	0,553 \pm 0,001	0,268 \pm 0,001	0,600 \pm 0,001	0,270 \pm 0,001	0,234 \pm 0,001	0,115 \pm 0,001
1200 \pm 1	0,607 \pm 0,001	0,292 \pm 0,001	0,651 \pm 0,001	0,293 \pm 0,001	0,253 \pm 0,001	0,124 \pm 0,001

Figura: Estator com 2 sequencias de bobinas

