



RENOMAT 2018

8ª Conferência Internacional de
Materiais e Processos para Energias
Renováveis

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE GERADORES E MOTORES ELÉTRICOS¹

Carlos Omar Klassmann², Moisés de Mattos Dias³, Milton Jose de Azevedo Ramires⁴, Jonata Rocha Fett⁵, Marco Antônio Fröhlich⁶, Gilson Gonçalves Jacoby⁷, Monir Goethel Borba⁸, Halston José Mozetic⁹, Renato Mazzini Callegaro¹⁰, Felipe Guimarães Ramos¹¹, Lirio Schaeffer¹²

RESUMO: Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento (estudo, projeto e construção) de uma bancada para ensaios de máquinas elétricas rotativas, tanto no funcionamento como motor quanto gerador elétrico. A bancada é composta por inversores de frequência, amperímetros, voltímetros e wattímetros, célula de carga (sensor de torque), tacômetro e banco de cargas resistivas e motor/gerador funcionando como máquina primária. Nos testes como gerador, um motor, acionado pelo inversor, gira o eixo do gerador, e a célula de carga detecta o torque no eixo entre as máquinas. A partir de um tacômetro mede-se a velocidade angular do eixo. Com estes dados é possível obter a potência mecânica. Ligando o banco de cargas resistivas na saída do gerador, mede-se a potência bem como tensão e corrente, obtendo-se então a potência elétrica. O rendimento da máquina será a razão entre a potência elétrica de saída e a potência mecânica de entrada. A mesma bancada pode testar uma máquina funcionando como motor, bastando que seja medida a potência elétrica na entrada do motor, utilizando-se um gerador como carga do motor. Neste caso o rendimento será razão entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada. Foram testadas duas máquina elétricas síncronas rotativas com ímãs permanentes e núcleo do rotor construído a partir de ferro puro sinterizado. A máquina de 7,5 kW, gerou uma tensão de linha de 371 V a plena carga com rendimento de 91,99%, e a máquina de 2,5 kW gerou uma tensão de linha de 419,4 V a plena carga com rendimento de 90,21%. Como se trata de máquinas protótipos, os testes na bancada serviram também para gerar dados para futuros ajustes nas máquinas desenvolvidas.

Palavras Chave: Bancada de Ensaio de Máquinas Elétricas, Motor e Gerador, Rendimento de Máquinas Elétricas, Metalurgia do pó

¹ Contribuição técnica a ser apresentada na 8ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis – RENOMAT 2018, Brasil/RS, 3 a 5 de outubro de 2018, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Mestrando Caracterização de Materiais e Processos Industriais. ICET, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 - CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo / RS / Brasil – Fone: (51) 35868800 - e-mail: carlosklassmann@bol.com.br;

³ Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. Eletrônica e Mestrado em Tecnologia de Materiais. ICET, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo / RS / Brasil - Fone: (51) 35868800 - e-mail: moisesdias@feevale.br.

^{4,5} Graduando Eng. Eletrônica. ICET, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo / RS / Brasil – Fone: (51) 35868800 - e-mail: miltonjramires@gmail.com, jonata-fett@hotmail.com.

⁶ Graduando Eng. Mecânica. ICET, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo / RS / Brasil – Fone: (51) 35868800 - e-mail: adesvandroo@hotmail.com;

⁷ Me Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, ICET, Universidade Feevale, Campus II, RS 239, 2755 – CEP 93352000 – Novo Hamburgo / RS / Brasil - Fone: (51) 35868800 - e-mail: gilsonjacoby@terra.com.br;

⁸ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre / RS / Brasil - Fone: (051) 3308.6134 - e-mail: monir.borba@ufrgs.br.

⁹ Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. Mecânica. Uniritter, Porto Alegre / RS / Brasil – Fone: (51) 3230.3300 - e-mail: halston_mozetic@uniritter.edu.br;

¹⁰ Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. ,Mecânica IFSul-Rio-grandense, campus Sapucaia do Sul. Av. Copacabana, 100 - CEP 93.216-120 - Bairro Piratini, Sapucaia do Sul / RS / Brasil – Fone: (051) 3452-9200 - e-mail: renatomc@sapucaia.ifsul.edu.br;

¹¹ Me Eng. Metalúrgica e Materiais (PPGE3M / LdTM / UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre / RS / Brasil - Fone: (051) 3308.6134 - e-mail: felipe.guiramos@gmail.com.

²¹ Prof. Dr. - Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, (PPGE3M), UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre / RS / Brasil. - Fone: (051) 3308.6134 - e-mail: schaefer@ufrgs.br;

1. INTRODUÇÃO

1.1. Máquinas Elétricas Rotativas

A geração de energia elétrica alternada é realizada a partir de máquinas elétricas rotativas, no qual os enrolamentos de campo, alimentados por corrente contínua, induzem tensões, geralmente trifásicas, nos enrolamentos de armadura, onde é gerada a potência elétrica do gerador. Em algumas máquinas, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs de Nd-Fe-B [1,2]. Outras fontes como baterias e células fotovoltaicas, geram tensão contínua que, eventualmente, a partir de inversores geram tensão alternada, monofásica ou trifásica.

Considerando os geradores trifásicos, estes devem ser acionados por uma máquina primária, como motores a combustão, no caso de grupos motor-gerador (gasolina, álcool, diesel, gás) ou por uma turbina como eólica, hidráulica, vapor. Salienta-se que as usinas termoelétricas (carvão) ou nucleares (urânio), reações a partir destes produtos aquecem a água, gerando vapor, que por sua vez irá acionar a turbina [3].

As máquinas elétricas rotativas possuem duas partes básicas que são os núcleos do estator e rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de maior rendimento, como os geradores, são construídas com chapas de aço-silício e percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, um processo para isolamento elétrico, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste em um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, ocorrendo a oxidação da superfície das chapas e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidas pelos fabricantes com uma pintura a base de óxidos sobre uma das superfícies [1,2,3].

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas, onde circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, diminuindo as perdas por correntes de Foucault [1,2,3].

Contudo, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (M/P) é possível construir estes núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e maior resistividade elétrica, se comparadas ao aço convencional, o que reduz as correntes parasitas [4,5]. No caso da aplicação deste processo na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas, pode resultar em máquinas com algumas vantagens sobre aquelas com núcleos convencionais. Assim, na medida em que for possível construir núcleos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção das máquinas e menos energia será consumida na fabricação das mesmas. Salienta-se também que com a utilização de ligas magnéticas de maior resistividade na

construção dos núcleos do estator e do rotor, haverá uma redução nas perdas por correntes parasitas, maior rendimento, resultando assim economia de energia elétrica.

Atualmente a aplicação da M/P em núcleos de máquinas elétricas está restrita a motores elétricos especiais para os quais o rendimento não é o critério mais importante, como no caso de minimotores de geometria complexa, em alguns servomotores nos quais os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada e partes de máquinas onde não há variação de fluxo, como núcleos de rotores de máquinas síncronas. Entretanto, alguns estudos estão sendo realizados em outros tipos de máquinas obtidas a partir da M/P no intuito de se comprovar ou descartar a aplicação desta tecnologia nestes dispositivos [5].

1.2. Máquinas Elétricos Trifásicos com Ímãs Permanentes

Com relação ao aspecto construtivo, as máquinas trifásicas são constituídas fundamentalmente de duas partes [1,2,3]:

- **Estator:** Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de armadura* com alimentação trifásica, defasadas de 120°. Os enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante.
- **Rotor:** Parte girante da máquina também construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de campo*. Em algumas máquinas trifásicas síncronas, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes.

A evolução das máquinas síncronas está relacionada com o progresso e descobertas na área de materiais magnéticos. A substituição dos enrolamentos de campo por ímãs permanentes de alto produto energético permitiu significativos avanços para a máquina que, atualmente, é considerada como aquela que mais apresenta variações de tamanho, forma, geometria e configurações. A utilização dos ímãs permanentes trouxe vantagens destas máquinas em comparação com aquelas que possuem enrolamentos de campo, tais como [6]:

- Simplificação da tecnologia.
- Redução de aproximadamente 10% do seu volume.
- Eliminação da fonte de alimentação externa, escovas e anéis coletores.
- Desenvolvimento de equipamentos com uma maior relação potência por volume de material.
- Redução de massa e do momento de inércia.

Os ímãs produzidos com ligas de materiais chamados de terras-raras, como o samário-cobalto e o neodímio-ferro-boro, são os que apresentaram melhores resultados em aplicações que requerem alto desempenho ou que precisem de máquinas leves e compactas [6].

As máquinas síncronas com ímãs permanentes podem ser classificadas conforme a orientação da densidade de fluxo magnético de excitação no entreferro em dois principais tipos: radial e axial. A máquina de fluxo radial, mostrada na figura 1, possui a

direção da densidade do fluxo de magnético perpendicular ao eixo do rotor. Os ímãs utilizados possuem magnetização com direção radial e estão localizados na superfície ou no interior do rotor. Estas máquinas apresentam rotores com diâmetros reduzidos e de baixa inércia, baixas perdas e tem o comprimento axial maior em relação ao seu diâmetro. São mais facilmente encontradas no mercado atualmente devido a sua robustez e fácil construção mecânica [1,2, 6-9].

As máquinas de fluxo axial possuem a direção da densidade do fluxo de magnético de excitação no entreferro paralela ao eixo de rotação e o entreferro está localizado em um plano perpendicular ao do eixo. A figura 2 mostra a topologia deste tipo de máquina. Os ímãs empregados apresentam magnetização axial e são fixados em discos que, dependendo da configuração, podem ser girantes ou estacionários. Estas máquinas são caracterizadas por possuírem uma geometria semelhante a um disco, com diâmetro muito maior que se comprimento longitudinal. É uma excelente alternativa para aplicações que requerem alto torque em baixas velocidades [1,2, 6-9].

Existe um terceiro tipo de fluxo em máquinas com ímãs permanentes que é a máquina com fluxo transversal [10].

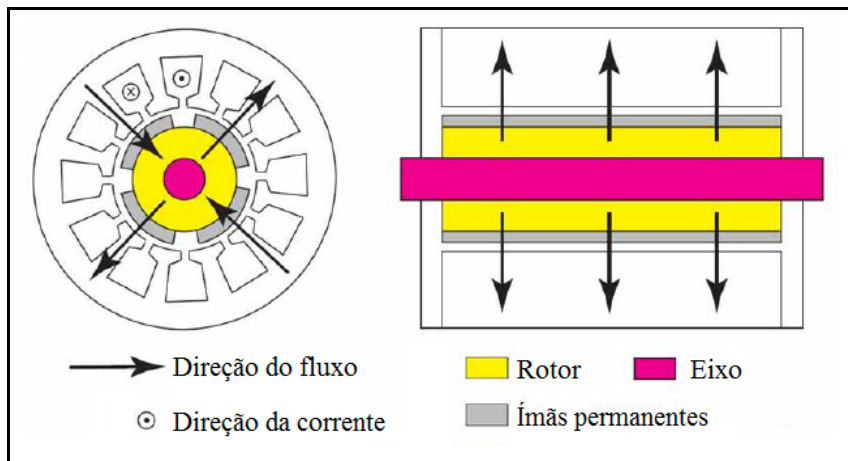


Figura 1 – Máquina de fluxo radial [7]

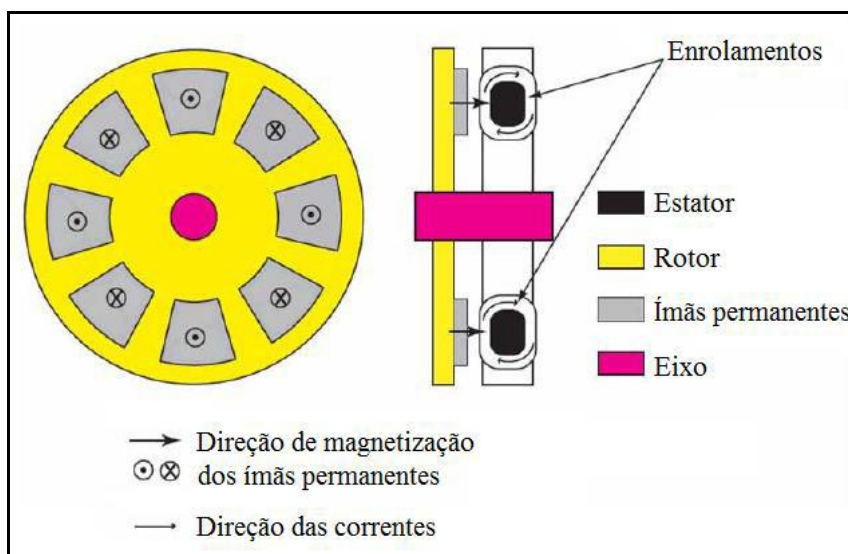


Figura 2 – Máquina de fluxo axial [7]

O LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica) da UFRGS vem desenvolvendo parceria com outras instituições, como as Universidades FEEVALE, ULBRA e outras instituições projetos de máquinas elétricas trifásicas a serem utilizados em pequenos aerogeradores de até 10 kW [6,11,12]. Nestes estudos, a carcaça, eixo, tampas e rolamentos são de um motor de indução trifásico de 10 cv. O núcleo do estator foi construído de chapas ou material sinterizado, e três topologias de rotor com material sinterizado e ímãs permanentes foram estudados e construídos.

A figura 3-a mostra o núcleo do estator das máquinas utilizadas como base, e a figura 3-b mostra o estator embutido na carcaça da máquina (Voges Motores).

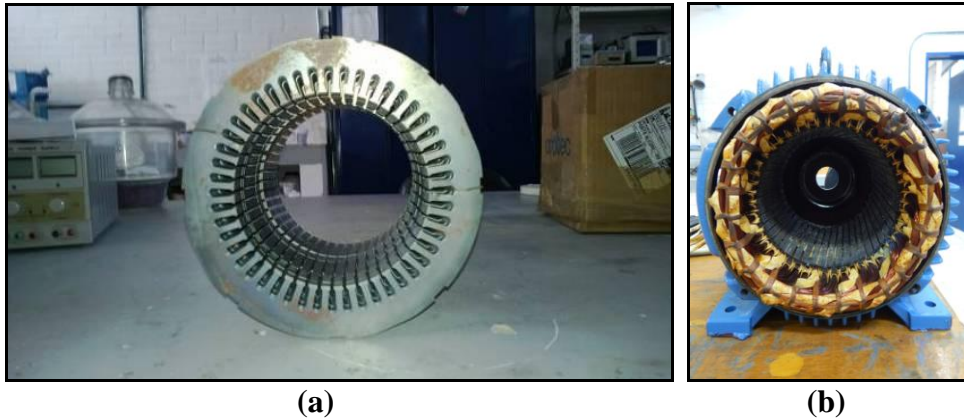


Figura 3 – Motor utilizado base – (a) Estator – (b) Estator embutido na carcaça [6]

A figura 4 mostra o rotor de polos salientes, a figura 5 o rotor de polos lisos e a figura 6 o rotor com ímãs embutidos.

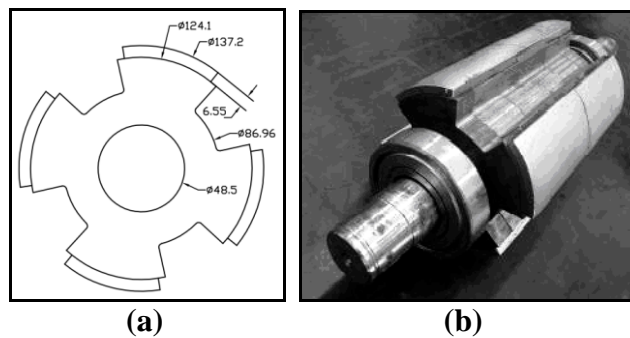


Figura 4 – Rotor de polos salientes – (a) Desenho esquemático – (b) rotor montado [11]

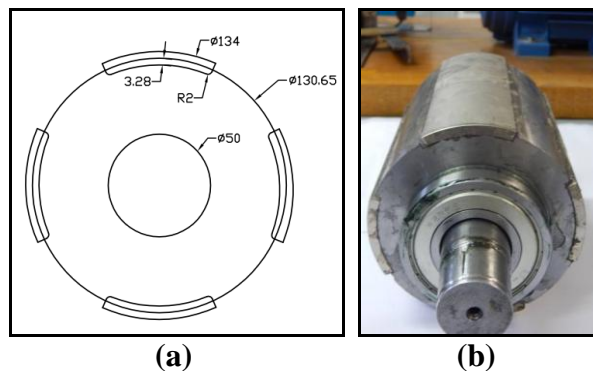


Figura 5 – Rotor de polos lisos – (a) Desenho esquemático – (b) rotor montado [6]

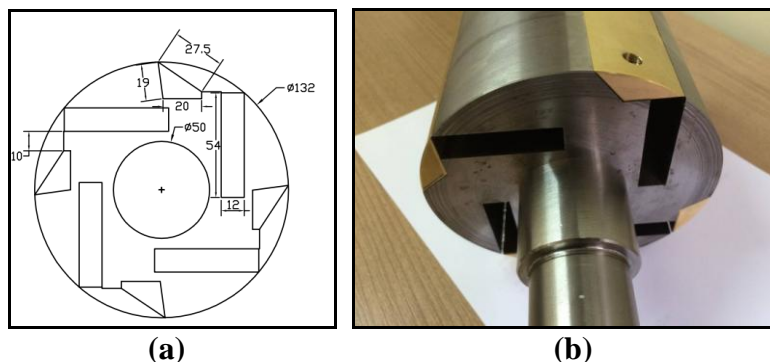


Figura 6 – Rotor com ímãs embutidos – (a) Desenho esquemático – (b) rotor montado [12]

1.3. Rendimento de Máquinas Elétricas

Numa máquina elétrica rotativa ideal, no funcionamento como gerador ou motor, a potência mecânica no eixo é calculada como [13]:

$$P_{mec} = \tau_{ext} \cdot \omega \quad [1]$$

onde P_{mec} é a potência mecânica [W], τ_{ext} o torque desenvolvido no eixo [N.m] e ω a velocidade angular [rad/seg].

A potência elétrica elétrica é calculada como [13]:

$$P_{ele} = VI \quad [2]$$

onde P_{ele} é a potência elétrica [W], V a tensão elétrica [V] e I a corrente elétrica [A].

Para uma máquina ideal, sem perdas, o princípio da conservação de energia estabelece que a potência mecânica (P_{mec}) deve ser idêntica a potência elétrica (P_{ele}), assim [13]:

$$P_{mec} = P_{ele} \Rightarrow \tau\omega = VI \quad [3]$$

Entretanto, para as máquinas elétricas rotativas ideais, no funcionamento como motor, nem toda energia elétrica entregue a máquina é convertida em energia mecânica. O mesmo raciocínio análogo, pode ser feito para o funcionamento como gerador. Isto ocorre pois existem perdas nas máquinas elétricas. Estas perdas podem ser avaliadas a partir dos princípios da conversão eletromecânica de energia, onde energia elétrica é transformada em energia mecânica, como mostrado na Eq. 3. No funcionamento como motor de uma máquina elétrica rotativa, a Eq. 3 pode ser reescrita como [13]:

$$P_i = P_o + P_{Ra} + P_{mag} + P_M + P_d \quad [4]$$

onde todos os fatores representados na equação C.4 são potências dadas em [Watts], e representam [13]:

- P_i \Rightarrow potência elétrica de entrada, fornecida pela fonte de tensão elétrica;
- P_o \Rightarrow potência mecânica de saída, fornecida à carga acoplada ao eixo do motor;
- P_{Ra} \Rightarrow potência dissipada nos enrolamentos de armadura, que representam as perdas nos enrolamentos da máquina;
- P_{mag} \Rightarrow potência representando as perdas magnéticas por ciclo de histerese e correntes de Foucault;
- P_M \Rightarrow potência representando as perdas mecânicas para ventilação da máquina e atrito entre o eixo e os mancais;
- P_d \Rightarrow potência representando outras perdas diversas.

O mesmo raciocínio análogo, pode-se fazer para o funcionamento como gerador. O desempenho de uma máquina pode ser medido a partir de seu rendimento η , que considera as perdas na máquina relacionando a potência de entrada e a potência de saída, ou seja [13]:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad [5]$$

Um fator importante no desempenho das máquinas elétricas rotativas são as perdas magnéticas. Fatores como aumento da resistividade elétrica e diminuição da coercitividade magnética dos núcleos do estator e do rotor diminuem estas perdas aumentando o rendimento da máquina.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Ensaio de Máquinas Elétricas

A máquina a ser testada como Motor (figura 7 à esquerda), é acoplada a um gerador (figura 7 à direita), que por sua vez, alimenta carga resistiva até a potência nominal da máquina, tanto do Motor a ser testado quanto do gerador. A figura 7 mostra ainda, uma célula de carga entre as máquinas, para medição do torque resultante entre os eixos das mesmas (detalhe na figura 7-c).

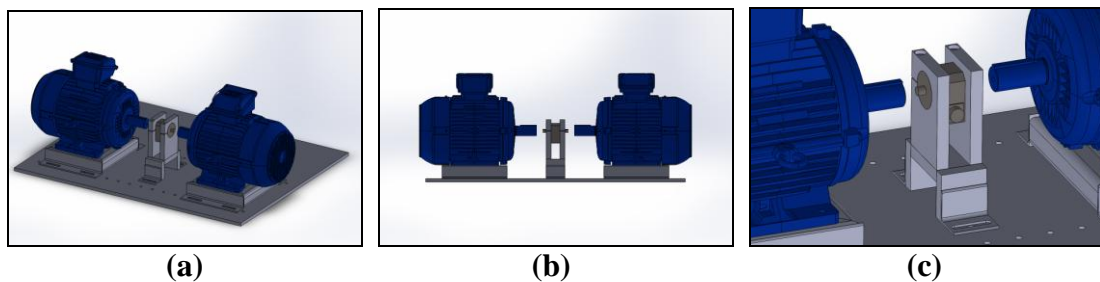


Figura 7 – Esquema para testes de Máquinas Elétricas Rotativas – (a) Vista em perspectiva – (b) vista frontal – (c) Detalhe da célula de carga

A figura 8 mostra um esquema geral de uma bancada para ensaios de máquinas elétricas rotativas, como Motor e como Gerador.

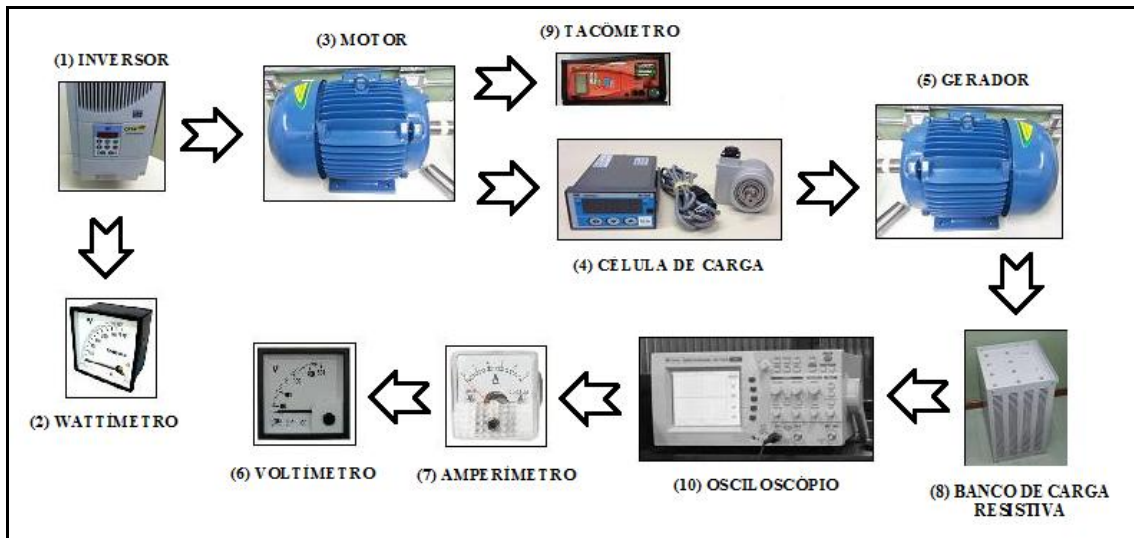


Figura 8 – Esquema da bancada proposta

A partir da figura 8 pode-se observar:

- (1) – Inversor Trifásico
- (2) – Wattímetro
- (3) – Motor
- (4) – Célula de Carga
- (5) – Gerador
- (6) – Voltímetro
- (7) – Amperímetro
- (8) – Banco de Carga Resistiva
- (9) – Tacômetro
- (10) - Osciloscópio

No funcionamento como Motor, a máquina a ser testada (3), é acionada pelo inversor Trifásico (1), o qual, além de proporcionar uma variação na velocidade da máquina, também informa a Tensão e a Corrente, sendo possível assim, determinar a Potência Aparente. A partir do Wattímetro (2) é possível determinar a Potência Ativa na entrada do Motor. O Gerador – Convencional Adquirido no Mercado – (5) funciona como Carga para o Motor (3) e ambos são acoplados a partir de uma Célula de Carga (4) com a qual é possível medir o torque no eixo e, portanto da carga. O Gerador (5) alimenta um Banco de Carga Resistiva (8), e a partir do Voltímetro (6) e Amperímetro (7) é possível determinar a Potência Ativa na saída do Gerador (5). A partir do Tacômetro (9) é possível medir a Velocidade Angular em RPM (rotação por minutos) no eixo entre as máquinas. A partir da velocidade e torque, determina-se a Potência Mecânica entre os eixos das máquinas. Um Osciloscópio (10) está ligado na saída do Gerador (5) para visualização de formas de onda de Tensão deste.

Nesta condição, o Motor é colocado e Girar até a Velocidade Nominal, e cargas são acopladas na saída do Gerador, até a potência nominal. Assim, o rendimento do Motor é calculado a partir das Eqs [1] e [5].

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_{mec}}{P_{ele}} = \frac{\tau_{ext} \cdot \omega}{P_{ele}} \quad [6]$$

Onde τ_{ext} é o torque [N.m] observado a partir da célula de carga, e ω a velocidade angular [rad/seg] observado a partir do tacômetro.

O FP (Fator de Potência) é determinado a partir da relação:

$$FP = \frac{P_{ativa}}{P_{Aparente}} = \frac{3 \cdot P_W}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L} \quad [7]$$

Onde P_W é a Potência Ativa na Entrada do Motor, observada a partir do Wattímetro (neste caso Wattímetro Monofásico, por este motivo multiplicado por 3), V_L e I_L são Tensão e Corrente de Linha respectivamente, observadas a partir do Inversor.

No caso de testes da máquina como Gerador (5), o Motor é Convencional – Adquirido no Mercado – (3), e neste caso, é muito importante a visualização de Formas de Ondas de Tensão a partir do Osciloscópio (10). O rendimento da máquina é calculado como:

$$\eta = \frac{P_{ele}}{P_{mec}} = \frac{3 \cdot V_F \cdot I_F}{\tau_{ext} \cdot \omega} \quad [8]$$

Onde V_F e I_F são a Tensão e a Corrente de Fase, observadas a partir do Voltímetro e Amperímetro respectivamente (neste caso multiplicado por 3 pro ser de fase – para trifásico). No caso em que são observados tensão e corrente de linha, ou seja V_L e I_L , deve ser feita a conversão pelo fator $\sqrt{3}$.

2.2. Projeto e Montagem da Bancada

A bancada proposta possui os dispositivos mostrados da figura 8, e a figura 9 mostra o projeto (desenho esquemático) da mesma. A figura 10-a mostra a bancada montada, e a figura 10-b mostra a mesma bancada com uma vista mais detalhada da célula de carga.

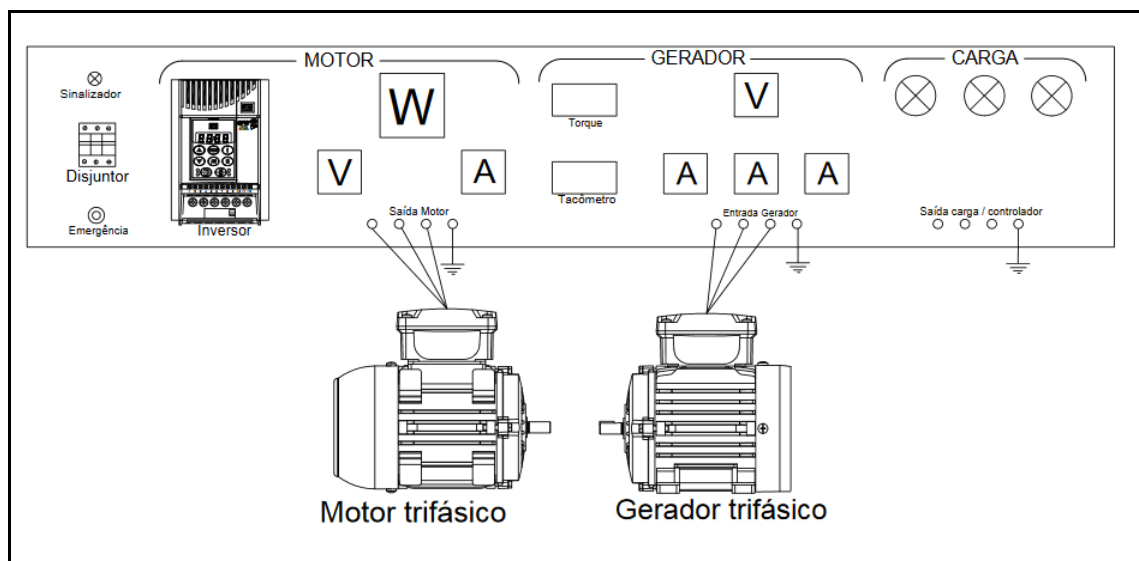


Figura 9 – Diagrama esquemática da bancada proposta

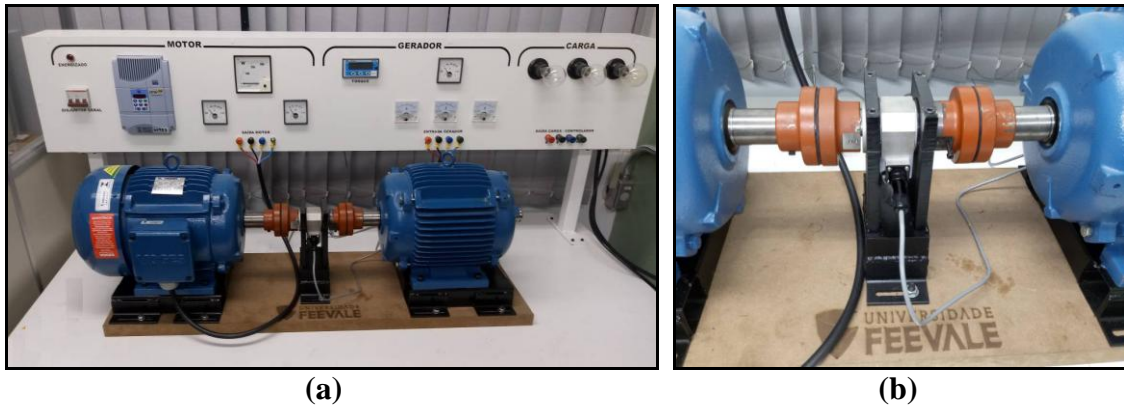


Figura 10 – Bancada para testes de Máquinas Elétricas Rotativas – (a) Vista geral – (b) Detalhe da Célula de Carga

Para os testes das máquinas na bancada a saída dos geradores é ligada a um banco de carga resistivo de potência nominal de 7,5 kW para tensão de 220 V fabricado por OHMIC com 9 resistências de potência máxima de 1kW cada (Fig. 11).

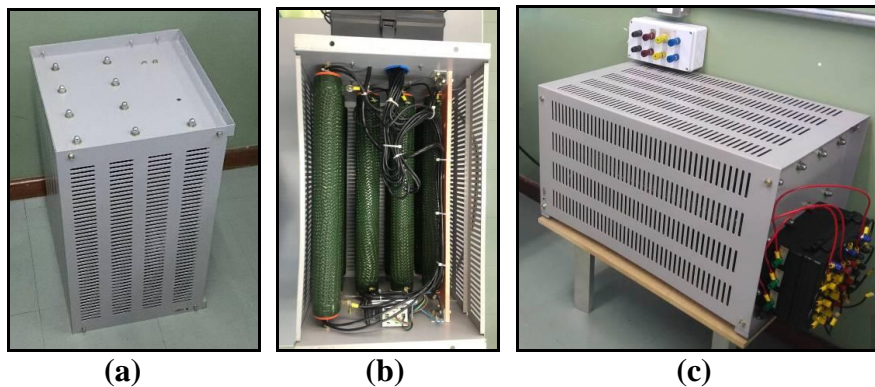


Figura 11 – Banco de Cargas Resistivas – (a) Vista Externa – (b) Detalhe das Resistências Internas – (c) Com Borges para Conexões Externas

Neste trabalho, duas máquinas síncronas com ímãs permanentes embutidos, rotor de material sinterizado e estator de chapas (ver topologia na figura 6) foram testadas, a saber, uma de 7,5 kW (figura 12) e outra de 2,5 kW (figura 13), ambas à direita nas respectivas figuras.



Figura 12 – Máquina Síncrona de 7,5 kW em testes na Bancada



Figura 13 – Máquina Síncrona de 2,5 kW em testes na Bancada

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 1 mostra o teste à Vazio (sem carga) da máquina de 7,5 kW funcionando como Gerador e a tabela 2 mostra os testes com o banco de carga resistiva de 7,5 kW. A tabela 3 mostra o teste à Vazio (sem carga) da máquina de 2,5 kW funcionando como Gerador e a tabela 4 mostra os testes com o banco de carga resistiva de 2,5 kW.

Tabela 1 – Testes à Vazio da Máquina de 7,5 kW funcionando como o Gerador

f [Hz]	V_{Li} [V]	I_{Li} [A]	P [W]	ω_m [rad/s]	τ [N.m]	P_{mec} [W]	V_{Lo} [V]	I_{Lo} [A]	P_{ele} [W]	η [%]	P_d [W]
60,0	429	5,8	200	188,49	1,6	297,6	439	0,00	0,0	0,00	297,6

Tabela 2 – Testes com Carga da Máquina de 7,5 kW funcionando como o Gerador

f [Hz]	V_{Li} [V]	I_{Li} [A]	P [W]	ω_m [rad/s]	τ [N.m]	P_{mec} [W]	V_{Lo} [V]	I_{Lo} [A]	P_{ele} [W]	η [%]	P_d [W]
60,0	408	15,3	2.750	188,49	40,5	7.404,9	371	10,60	6.811,5	91,99	593,4

Tabela 3 – Testes à Vazio da Máquina de 2,5 kW funcionando como o Gerador

f [Hz]	ω_m [rad/s]	τ [N.m]	P_{mec} [W]	V_{Lo} [V]	I_{Lo} [A]	P_{ele} [W]	η [%]	P_d [W]
60,0	188,49	1,64	299,9	475,5	0,00	0,0	0,00	299,9

Tabela 4 – Testes com Carga da Máquina de 2,5 kW funcionando como o Gerador

f [Hz]	ω_m [rad/s]	τ [N.m]	P_{mec} [W]	V_{Lo} [V]	I_{Lo} [A]	P_{ele} [W]	H [%]	P_d [W]
60,0	188,49	17,75	3.245,3	419,4	4,03	2.927,5	90,21	317,9

Nas tabelas 1 a 4 os dados foram obtidos da seguinte maneira:

- Frequência f [Hz] obtida a partir do Inversor Trifásico

- Tensão de Linha na Entrada do Motor V_{Li} [V] obtido a partir de um Voltímetro
- Corrente de Linha na Entrada do Motor I_{Li} [V] obtido a partir de um Amperímetro
- Potência por Fase na Entrada do Motor P [W] obtido a partir de um Wattímetro
- Torque na entrada do Gerador τ [N.m] obtido a partir do sensor de Torque
- Tensão de Linha na Saída do Gerador V_{Lo} [V] obtido a partir de um Voltímetro
- Corrente de Linha na Saída do Gerador I_{Lo} [V] obtido a partir de um Amperímetro
- Velocidade angular dos eixos do Motor e Gerador ω_m [rad/s] calculada como:

$$\omega_m = \pi \cdot f \quad [8]$$

- Potência Mecânica na Entrada do Gerador P_{mec} [W] calculada como:

$$P_{mec} = \tau \cdot \omega_m \cdot K \quad [9]$$

Onde $K = 0,97$ é uma constante que considera a perda de potência no acoplamento entre os eixos da Célula de Carga do Sensor de Torque e o eixo do Gerador

- Potência Elétrica na Saída do Gerador P_{ele} [W] calculada como:

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad [10]$$

- Rendimento η [%] calculado como:

$$\eta = \frac{P_{ele}}{P_{mec}} \times 100\% \quad [11]$$

- Perdas P_d [W] calculadas como:

$$P_d = P_{mec} - P_{ele} \quad [12]$$

Com relação aos dados obtidos das tabelas 1 e 2 (ensaios da máquina de 7,5 kW), observa-se que, nos testes a vazio a tensão de linha resultou em 439 V e as perdas em 297,6 W. Estas perdas compreendem as perdas magnéticas e mecânicas. Já nos testes com carga, a tensão de linha resultou em 371 V, a corrente de linha em 10,6 A, a potência na saída do Gerador em 6.811,5 W, o rendimento em 91,99% e as perdas em 593,4 W, valores que estão dentro das características de desempenho deste tipo de máquina [1,2,6,11,12,13]. No caso das perdas estas compreendem as perdas magnéticas, elétricas e mecânicas. Percebe-se que a tensão de saída, com carga, caiu para 371 V (deveria ter resultado em 380 V) e esta seria a causa que a potência na saída não resultou nos 7,5 kW do banco de cargas resistiva. Como se trata de uma máquina protótipo, esta queda pode ser corrigida, bastando que se rebobine novamente a máquina aumentando o número de espiras proporcionalmente a relação da tensão ideal (380 V) com a tensão obtida a plena carga (371 V). Assim, a potência na saída do Gerador seria os 7,5kW do banco de carga resistivo.

A figura 14-a mostra a forma de onda de tensão, por fase, na saída do Gerador sem carga (à Vazio), e a figura 14-b mostra a forma de onda com carga. Observa-se que, sem carga, existe uma distorção no segundo semi-ciclo da senoide, o que não ocorre na forma de onda com carga. Tal distorção ocorre devido a saturação de fluxo magnético de entreferro, e a mesma também pode ser corrigida, bastando que se redimensione os ímãs embutidos no interior do núcleo do rotor, e tal correção seria possível a partir de simulações com software de elementos como o FEMM 4.2 [14].

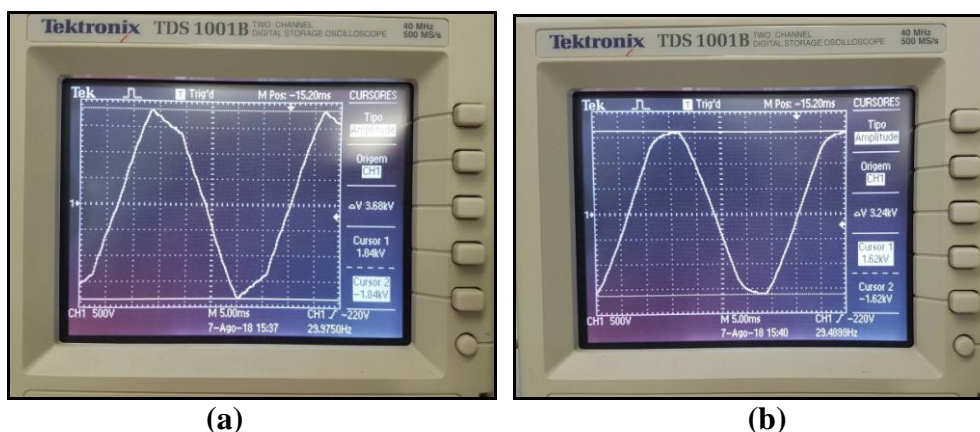


Figura 14 – Formas de onda de Tensão de uma das Fases da Máquina de 7,5 kW – (a) Sem Carga – (b) com Carga

Com relação aos dados obtidos das tabelas 3 e 4 (ensaios da máquina de 2,5 kW), observa-se que, nos testes a vazio a tensão de linha resultou em 475,5 V e as perdas em 299,9 W. Já nos testes com carga, a tensão de linha resultou em 419,4 V, a corrente de linha em 4,03 A, a potência na saída do Gerador em 2.927,5 W, o rendimento em 90,21% e as perdas em 317,9 W, valores que estão dentro das características de desempenho deste tipo de máquina [1,2,6,11,12,13].. Percebe-se que, para a máquina de 2,5 kW a tensão de saída, com carga, caiu para 419,4 V (deveria ter resultado em 380 V) e esta seria a causa que a potência na saída ultrapassou os 2,5 kW do banco de cargas resistiva. Neste caso, diferentemente da máquina de 7,5 kW, a correção ocorrerá, bastando que se rebobine novamente a máquina diminuindo o número de espiras proporcionalmente a relação da tensão ideal (380 V) com a tensão obtida a plena carga (419,4 V). Assim, a potência na saída do Gerador seria os 2,5kW do banco de carga resistivo.

4. CONCLUSÕES

Os testes de bancada com as duas máquinas desenvolvidas (7,5 kW e 2,5 kW), além de gerar os dados de desempenho e rendimento das mesmas, ainda proporcionou dados para as correções dos protótipos desenvolvidos, a saber, como ajustar a tensão de saída para a tensão nominal padrão, ou seja os 380 V, bem como as correções das formas de onda das tensões geradas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem a Secretaria do Desenvolvimento Econômico, Ciência e Tecnologia do Estado do RS pela patrocínio e apoio neste projeto, ao CNPq, Capes, FINEP e FAPERGS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. FITZGERALD, A.E, KINGSLEY, Jr. C, UMANS, S.D. **Electric Machinery**. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.
- [2]. NASAR, S.A. **Handbook of Electric Machines**. New York, McGraw-Hill, 1987.
- [3]. Características e Especificações de Gerador – Apostila WEG Motores - <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> – Acessado em 23/07/2016
- [4]. JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992. p.63-66.
- [5]. KRAUSE, R.F., BULARZIK, J.H., KOKAL, H.R. **New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications**. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, Dec. 1997. p.710-712.
- [6]. BORBA, M. G. **Desenvolvimento de Uma Máquina Síncrona Trifásica com Núcleo do Rotor Produzido a partir da Metalurgia do Pó e Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro para Aplicação em Aerogeradores**. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. UFRGS / PPGE3M. Porto Alegre. 2016
- [7]. MAIA, T. A. C.. **Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- [8]. FERREIRA, Ângela Paula Barbosa da Silva. **Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica**. Tese (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [9]. RAMOS, F. G.. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs de Nd-Fe-B e núcleo do estator a partir de Fe₂P sinterizado aplicado em aerogerador de 1kW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [10]. VERDUM, V.. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- [11]. CERVA, Luciano Lohmann. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA COM ÍMÃS PERMANENTES E NÚCLEO SINTERIZADO UTILIZADA EM AEROGERADOR**. Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014

[12]. JACOBY, Gilson Gonçalves. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ROTATIVA TRIFÁSICA POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADA EM GERADOR EÓLICO DE 5 KW.** Dissertação de mestrado. Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2016.

[13]. DIAS, Moisés de Mattos. **CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE RELUTÂNCIA TRIFÁSICA COM ROTOR DE MATERIAL MAGNÉTICO MACIO SINTERIZADO.** Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

DEVELOPMENT OF A BENCH FOR TESTS OF GENERATORS AND ELECTRIC MOTORS¹

ABSTRACT

The aim of this work was the development (study, design and construction) of a bench for tests of rotate electrical machines, functioning as an electric motor and generator. The bench is made with frequency inverters, ammeters, voltmeters and wattmeters, load cell (torque sensor), tachometer, resistive load bank and motor / generator running as a primary machine. In tests as a generator, an inverter driven motor, rotates the generator shaft, and the load cell detects the torque on the shaft between the machines. From a tachometer the angular velocity of the axis is measured. With this data it is possible to obtain mechanical power. By connecting the bank of resistive loads at the output of the generator, the power, voltage and current are measured, and electric power is obtained. The efficiency of the machine will be the ratio of the electrical output power to the mechanical input power. The same bench can test a machine running as an motor, simply by measuring the electric power at the motor input, using a generator as the motor load. In this case the efficiency will be the ratio between the mechanical output power and the input electrical power. Two rotating synchronous electric machines with permanent magnets and rotor core constructed from pure sintered iron were tested. The 7.5 kW machine generated a line voltage of 371 V at full load in 91.99% yield, and the 2.5 kW machine generated a line voltage of 419.4 V at full load with yield of 90.21%. As it deals with prototype machines, the tests in the bench also served to generate data for future adjustments in the machines developed.

Key-words: Electric Machine Testing, Motor and Generator Testing, Electric Machine Performance, Powder metallurgy