



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**PROPOSTA DE PRÁTICAS DE LABORATÓRIO COM
MÁQUINAS SÍNCRONAS**

**Autor: Rodrigo Silva Rodrigues
Orientador: Flávio Henrique J. R. da Silva**

**Brasília, DF
2016**



Rodrigo Silva Rodrigues

PROPOSTA DE PRÁTICAS DE LABORATÓRIO COM MÁQUINAS SÍNCRONAS

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique J. R. da Silva

**Brasília, DF
2016**

Rodrigues, Rodrigo Silva.

Proposta de práticas de laboratório com máquinas síncronas / Rodrigo Silva Rodrigues. Brasília: UnB, 2016. 48 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Flávio
Henrique J. R. da Silva.

1. Máquina. 2. Síncrona. 3. Laboratório.
I. Silva, Flávio Henrique J. R. da. II. Doutor.

CDU Classificação



Rodrigo Silva Rodrigues

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 15/12/16, apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Flávio H. J. R. da Silva, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Cristiano Jacques Miosso, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr.: Rudi Henri van Els, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2016

Dedico este trabalho aos que confiam em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo.

“Não vos inquieteis, pois, pelo dia de amanhã, porque o dia de amanhã cuidará de si mesmo. Basta a cada dia o seu mal.”

Mateus 6:34.

RESUMO

As máquinas elétricas começaram a ser utilizadas no século XIX, contribuindo para o avanço industrial do mundo até os dias de hoje. Um tipo muito utilizado de máquina elétrica é a máquina síncrona, cuja velocidade de rotação é proporcional à frequência do sistema à qual está conectada. Uma máquina síncrona, após entrar em regime permanente de operação, pode ser entendida tendo em vista a interação de dois campos magnéticos, presentes no estator e no rotor, partes essenciais da máquina. Este trabalho apresenta teorias relacionadas com o funcionamento da máquina síncrona e as duas práticas elaboradas com a máquina trabalhando como gerador síncrono, operando a vazio e com cargas balanceadas e desbalanceadas, permitindo aos alunos compreender o funcionamento desse tipo de gerador. As práticas foram desenvolvidas e customizadas para que o tempo de execução não exceda o horário da aula de laboratório. A Prática com Gerador Síncrono a Vazio tem um tempo de execução estimado entre 30 e 45 minutos, já a Prática com Gerador Síncrono com Carga tem um tempo de execução estimado entre 60 e 75 minutos. Um grupo de estudantes da UnB realizou a Prática com Gerador Síncrono com Carga, utilizando carga RLC (resistiva-indutiva-capacitiva) balanceada, e a avaliaram como relevante para a disciplina Conversão Eletromecânica de Energia.

Palavras-chave: Máquina. Síncrona. Laboratório. Gerador síncrono. Motor síncrono.

ABSTRACT

Electrical machines began to be used in the nineteenth century, contributing to the world's industrial progress up to the present day. A widely used type of electric machine is a synchronous machine, whose speed is proportional to the frequency of the system to which it is connected. A synchronous machine, after entering steady state operation can be understood in view of the interaction of two magnetic fields, present in the stator and the rotor, essential parts of the machine. This work presents theories related to the operation of the synchronous machine and the two practices elaborated with the machine working as a synchronous generator, operating in a vacuum and with balanced and unbalanced loads, allowing the students to understand the operation of this type of generator. The practices have been developed and customized so that the execution time does not exceed the time of the laboratory class. The Practice with Synchronous to Empty Generator has an execution time estimated between 30 and 45 minutes, whereas the Practice with Synchronous Generator with Load has an execution time estimated between 60 and 75 minutes. A group of UnB students carried out the Practice with Synchronous Charge Generator using balanced RLC (resistive-inductive-capacitive) load and evaluated it as relevant for the discipline Electromechanical Energy Conversion.

Keywords: Machine. Synchronous. Laboratory. Synchronous generator. Synchronous motor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes integrantes do gerador WEG, modelo GTA250	04
Figura 2: Rotor liso e saliente de gerador síncrono.....	05
Figura 3: Característica conjugado x ângulo	06
Figura 4: Circuitos equivalentes de máquinas síncronas: (a) sentido de referência do tipo motor e (b) sentido de referência do tipo gerador.....	07
Figura 5: (a) impedância que interconecta duas tensões; (b) diagrama fasorial	08
Figura 6: Representação usando um circuito equivalente de uma máquina síncrona conectada a um sistema externo.....	09
Figura 7: Diagrama fasorial – Máquina síncrona de pólos salientes	10
Figura 8: Diagrama fasorial – Gerador síncrono mostrando as relações entre as tensões e as correntes	11
Figura 9: Diagrama de alimentação do inversor de frequência e de acionamento do motor assíncrono.....	13
Figura 10: Diagrama de controle de velocidades	13
Figura 11: Diagrama de montagem de (i) medição de tensões de saída do gerador e de (ii) excitação do gerador síncrono	14
Figura 12: Esquema de montagem de carga	16
Figura 13: Prática com gerador síncrono a vazio	18
Figura 14: Prática com gerador síncrono com carga.....	20
Figura A.1: Acoplamento entre motor assíncrono e gerador síncrono	31
Figura A.2: Diagrama de montagem de (i) medição de tensões de saída do gerador e de (ii) excitação do gerador síncrono	32
Figura B.1: Esquema de montagem de carga	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configuração do inversor de frequência.....	14
Tabela 2: Velocidade <i>versus</i> chaves seletoras	15
Tabela 3: Configuração do inversor de frequência.....	16
Tabela 4: Valores de tensão medidos no gerador.....	18
Tabela 5: Valores de tensões e correntes medidos na carga.....	21
Tabela 6: Avaliação dos estudantes sobre a prática realizada.....	25
Tabela A.1: Dados de placa do gerador síncrono	31
Tabela A.2: Configuração do inversor de frequência	32
Tabela A.3: Velocidade <i>versus</i> chaves seletoras	32
Tabela A.4: Valores de tensão medidos no gerador	33
Tabela B.1: Configuração do inversor de frequência	35
Tabela B.2: Valores medidos de tensões e correntes	35
Tabela B.3: Valores medidos de tensões e correntes	36
Tabela B.4: Valores medidos de tensões e correntes	36
Tabela B.5: Valores medidos de tensões e correntes	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES.....	9
4. METODOLOGIA.....	12
4.1 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO A VAZIO.....	12
4.1.1 MATERIAIS UTILIZADOS	12
4.1.2 PROCEDIMENTOS	12
4.2 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO COM CARGA	15
4.2.1 MATERIAIS UTILIZADOS	15
4.2.2 PROCEDIMENTOS	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO... ..	18
5.1 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO A VAZIO.....	18
5.2 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO COM CARGA	20
5.3 EXECUÇÃO DAS PRÁTICAS	23
6. CONCLUSÕES.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
APÊNDICES	29

1. INTRODUÇÃO

O uso de máquinas elétricas rotativas para conversão de energia teve início no século XIX, permitindo um grande avanço industrial no mundo.

Nesse tipo de máquina, a conversão eletromagnética de energia se dá com a variação do fluxo magnético provocada por movimento mecânico. A tensão é gerada nos enrolamentos, quando giram dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira próximo a eles, fazendo com que o fluxo magnético varie periodicamente, gerando uma tensão variável no tempo [1].

Uma parte da máquina rotativa, conhecida como enrolamento de armadura, conduz correntes alternadas, através de um grupo de bobinas conectadas em conjunto, que produzem fluxo magnético girante. Tanto em máquinas síncronas quanto em máquinas de indução, o enrolamento de armadura fica alojado na parte estacionária da máquina, conhecida como estator [2].

De maneira geral, as máquinas síncronas possuem um segundo conjunto de bobinas cuja função é a produção do fluxo principal que irá operacionalizar a máquina. Este conjunto, conhecido como enrolamento de campo, conduz correntes contínuas que produzem fluxo magnético estacionário. O enrolamento de campo está localizado na parte móvel da máquina, conhecida como rotor. Em alguns motores esse enrolamento de campo é substituído por ímãs permanentes [2].

Quando em regime permanente, a operação da máquina síncrona resulta, basicamente, da ação mútua entre dois campos magnéticos. Somente quando o rotor gira em sincronismo com o fluxo do estator é que é produzido um conjugado constante, proporcional ao seno do ângulo de deslocamento [2].

Na máquina síncrona, a potência ativa é determinada pela carga conectada ao eixo. A potência reativa, por sua vez, é influenciada pela excitação de campo. Quando a corrente de campo é baixa, a máquina consome potência reativa do sistema e eleva o ângulo de potência. Em determinado valor da corrente de campo, o fator de potência é igual a 1. A partir desse valor, qualquer aumento da corrente significa transferência de potência reativa para o sistema [2]. Os rendimentos das máquinas síncronas são superiores aos das máquinas de indução [3].

Um grande número de máquinas síncronas têm seu rotor e estator construídos com aço elétrico, um compósito de ferro e silício com capacidade de reter parte do calor dissipado na máquina, atenuando os efeitos das altas

temperaturas sobre certos componentes, aumentando tanto a eficiência quanto a durabilidade dessas máquinas [2].

Os geradores síncronos, que são máquinas síncronas responsáveis pela transformação de energia mecânica em energia elétrica, são responsáveis pelo fornecimento da energia elétrica consumida nas casas, indústrias, etc., e são utilizados em [4]:

- a. Usinas hidrelétricas;
- b. Aerogeradores;
- c. Grupos Diesel ou a gás;
- d. Turbogeneradores;

Os motores síncronos, que são máquinas síncronas responsáveis pela transformação de energia elétrica em energia mecânica, são largamente utilizados nas indústrias de [3]:

- a. Mineração: em britadores, moinhos, correias transportadoras, etc.;
- b. Siderurgia: em laminadores, ventiladores, bombas, compressores, etc.;
- c. Papel e celulose: em extrusoras, picadores, desfibradores, compressores, moedores, descascadores, etc.;
- d. Borracha: em extrusoras, moinhos, misturadores, etc.;

Os geradores síncronos fornecem tensões e correntes elétricas alternadas, em frequências de 50 Hz ou 60 Hz. As duas frequências foram definidas pelos modelos europeu e americano, respectivamente, sendo que cada país “escolheu” o modelo a ser adotado, a partir da compra de suas máquinas. O Brasil adota o padrão de 60 Hz, assim como Estados Unidos, Canadá, Colômbia, Venezuela e mais alguns poucos países pelo mundo. A maior parte dos países da Europa, da Ásia e da África adotam o padrão de 50 Hz, como Rússia, China, Inglaterra e África do Sul, assim como os sul americanos Paraguai, Argentina e Chile.

Como estão presentes na geração de energia e em larga escala na indústria, o estudo das máquinas síncronas é de fundamental importância para o Engenheiro de Energia. As práticas propostas permitirão aos alunos compreender seu funcionamento e seu comportamento em situações com e sem carga.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho traz um estudo da máquina síncrona, para entendimento das características de seu funcionamento, e tem como objetivo propor práticas experimentais com a máquina síncrona para as aulas de laboratório da disciplina de Conversão Eletromecânica de Energia da Faculdade UnB Gama.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar as melhores condições de se realizar as práticas a serem propostas para as aulas de laboratório da disciplina Conversão Eletromecânica de Energia;
- b) Proceder com as práticas experimentais utilizando a máquina síncrona, a fim de se testar a viabilidade de suas execuções;
- c) Avaliar o grau de dificuldade das práticas, através da realização das mesmas por estudantes da UnB;
- d) Apresentar resultados experimentais obtidos e analisar o comportamento da máquina síncrona diante das diferentes situações expostas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A máquina síncrona é um tipo de máquina elétrica onde sua velocidade rotacional está proporcionalmente ligada à frequência da fonte de alimentação.

O termo SÍNCRONO vem do grego e significa “com tempo”, dessa forma, tem-se que uma máquina síncrona trabalha “em tempo com” ou “em sincronismo com” uma fonte de alimentação [3].

As máquinas síncronas são utilizadas em escala cada vez maior nas indústrias graças a algumas especificidades em seu funcionamento, dentre as quais vale destacar seu alto rendimento e a possibilidade de trabalharem na correção do fator de potência da rede. Além destas também é possível citar o torque elevado, a velocidade constante mesmo com variações da carga e a manutenção reduzida [3].

Essas máquinas, como a da Fig. (1), possuem um enrolamento de armadura, no qual flui a corrente alternada, e um enrolamento de campo, responsável por uma corrente de excitação CC. Na grande maioria das máquinas síncronas o enrolamento de armadura está localizado no estator e o de campo no rotor [2].

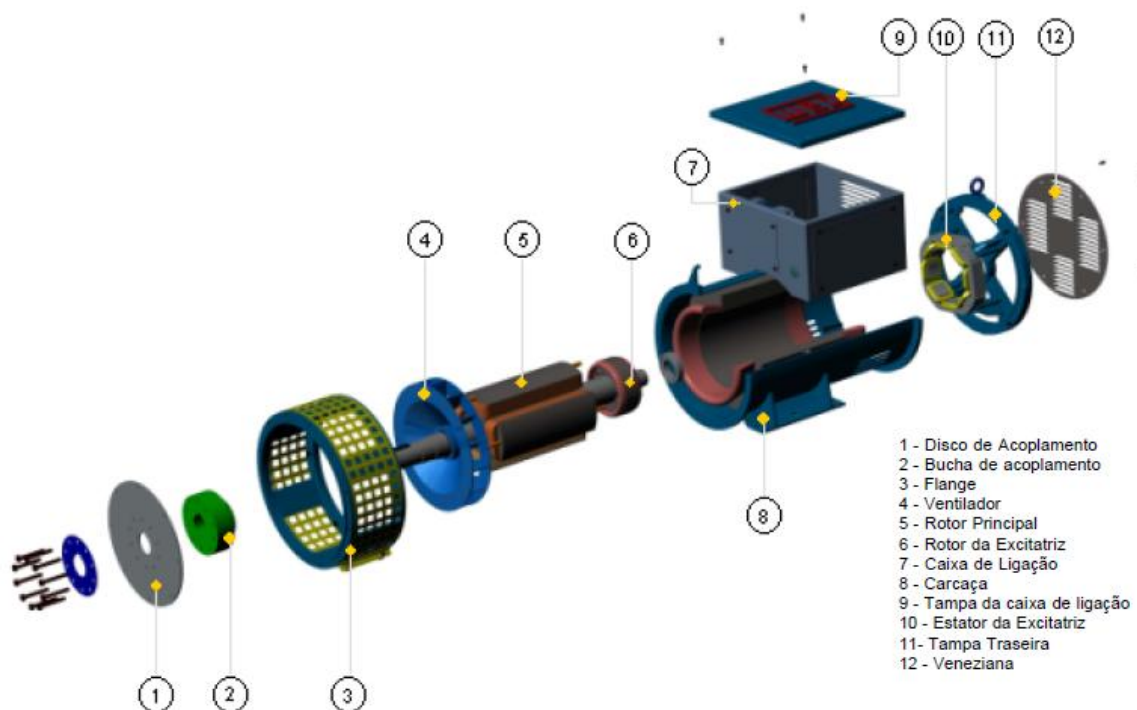


Figura 1. Partes integrantes do gerador WEG, modelo GTA250 [4].

Geradores hidrelétricos de baixa velocidade e os motores síncronos, em sua maioria, são construídos com pólos salientes. Uma característica construtiva desse

tipo de máquina é que seu diâmetro é, usualmente, maior do que sua profundidade, devido ao conjunto de bobinas [2].

A outra forma de construção, empregada em máquinas que trabalham a altas velocidades, é a que utiliza o rotor cilíndrico, como os da Fig. (2). Para potências elevadas, esse tipo de máquina requer um sistema de arrefecimento mais complexo, quando comparada com a de pólos salientes.

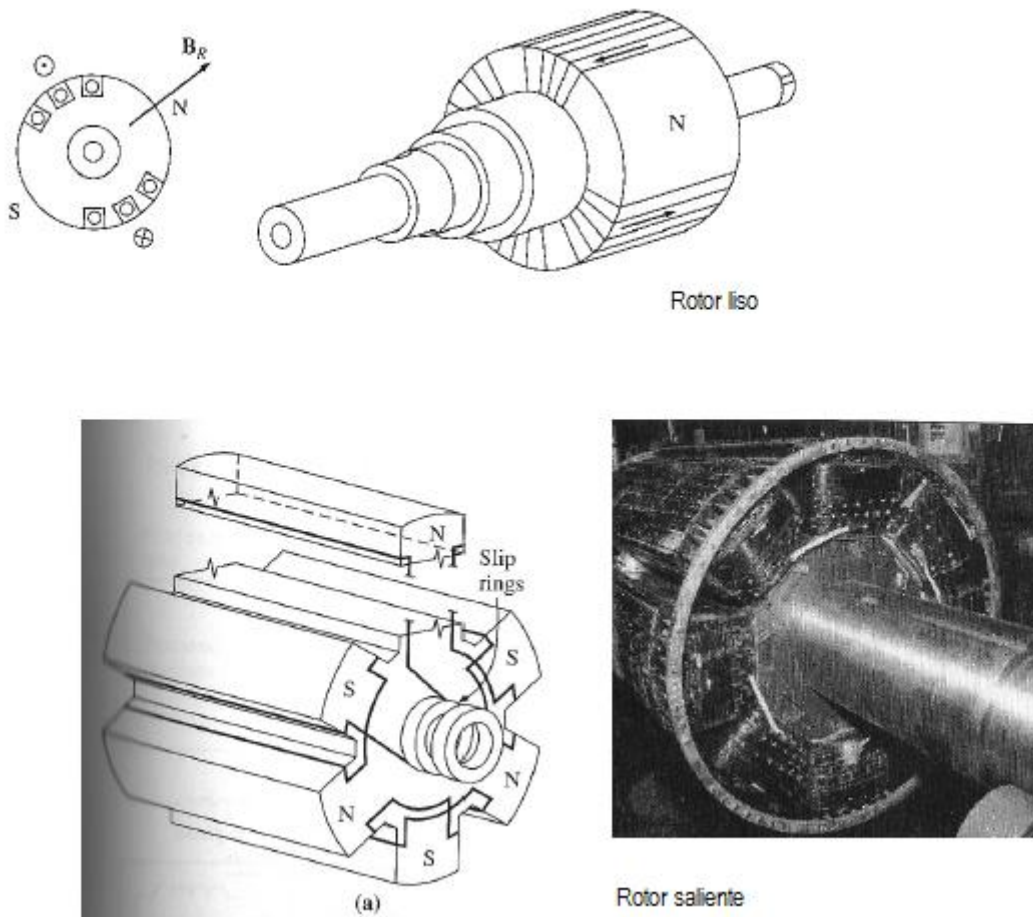


Figura 2. Rotor liso e saliente de gerador síncrono [5].

O sistema de excitação da máquina, cujo enrolamento de campo faz parte, fornece potência correspondente a uma pequena porcentagem dos valores nominais dessa máquina. A corrente CC pode ser produzida em uma excitatriz CC ou CA, conectada ao eixo da máquina síncrona. No caso de máquina CA, o sistema de retificação pode estar acoplado à máquina ou pode estar fixado no estator. A corrente CC produzida na excitatriz pode ser fornecida ao enrolamento de campo de duas formas: através de anéis coletores ou diretamente no enrolamento; este último é conhecido como sistema de excitação sem escovas, ou *brushless* [2].

As escovas são blocos de carbono composto que conduzem eletricidade continuamente. Como possuem baixa fricção, seus anéis deslizantes sofrem pouco desgaste. Caso uma fonte CC seja conectada aos anéis, uma mesma tensão será aplicada ao enrolamento, independentemente da posição angular ou velocidade do rotor [5].

Quando uma máquina síncrona opera em regime permanente, pode-se utilizar a Eq. (1) do conjugado

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p \text{ólos}}{2} \right)^2 \Phi_R F_f \sin \delta_{RF} \quad (1)$$

para verificar seu comportamento, onde Φ_R é o fluxo resultante no entreferro, F_f é a FMM do enrolamento de campo e δ_{RF} é o ângulo de fase elétrica [2]. O conjugado eletromecânico atua no mesmo sentido de rotação do eixo, dessa forma, opõe-se ao conjugado mecânico, balanceando o sistema.

Como é possível verificar na Eq. (1), variações no conjugado eletromecânico provocam variações no δ_{RF} . Na Fig. (3) abaixo é possível ver graficamente essa relação.

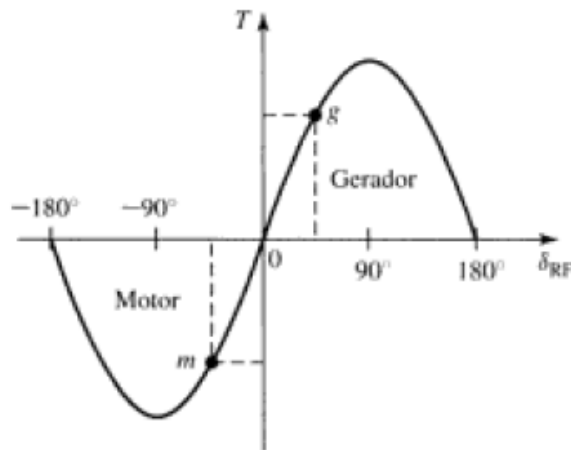


Figura 3. Característica conjugado x ângulo [2].

Quando os valores de conjugado são positivos, temos o sistema com ação geradora, quando são negativos, temos o sistema com ação motora.

Se o motor síncrono sofrer um aumento de carga no eixo além do valor máximo do conjugado eletromecânico, seu rotor perderá o sincronismo, desacelerando.

Em um motor síncrono, o conjugado eletromecânico só é desenvolvido ao se atingir a velocidade de sincronismo, dessa forma, não é possível parti-lo apenas com tensão de armadura e frequência nominal. Um dos métodos de partida utiliza um motor CC acoplado ao eixo do que se quer partir. Pode-se utilizar também um motor de indução para realizar a partida. O método mais empregado, porém, é o que utiliza enrolamentos amortecedores, fazendo com que o motor síncrono funcione como motor de indução tipo gaiola de esquilo [6].

O projeto de construção da máquina síncrona deve basear-se em três situações de carga [7]:

- i. Conjugado de partida: deve transpor a resistência do conjugado com carga parada (conjugado de arranque da carga);
- ii. Conjugado de sincronização: deve levar a carga à velocidade de sincronismo (*pull-in torque*);
- iii. Conjugado máximo em sincronismo: deve manter a máquina sem perda de sincronismo, mesmo em sobrecarga (*pull-out torque*);

A análise de operação de uma máquina síncrona é a mesma tanto para gerador quanto para motor.

A Fig. (4) abaixo mostra o circuito equivalente de uma máquina síncrona, com o sentido da corrente representada para o caso em que a máquina opera como motor (a), ou como gerador (b).

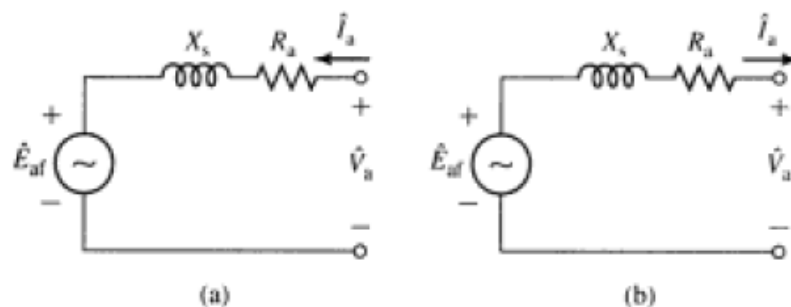


Figura 4. Circuitos equivalentes de máquinas síncronas: (a) sentido de referência do tipo motor e (b) sentido de referência do tipo gerador [2].

A Fig. (4) traz uma representação monofásica de uma máquina trifásica operando em equilíbrio trifásico. Após obtenção da corrente e tensão na fase *a*, pode-se definir os valores para as fases *b* e *c*, simplesmente deslocando os ângulos em -120° para a fase *b* e 120° para a fase *c*. Para definir a potência total da máquina basta multiplicar a potência da fase *a* por 3.

A potência com que uma máquina síncrona pode trabalhar está limitada pelo conjugado atuante, e será máxima quando máximo for o conjugado, sem que se perca o sincronismo com o sistema ao qual a máquina está conectada [2].

A Fig. (5a) mostra um circuito elétrico representando, simplificada, duas tensões separadas por uma impedância. A Fig. (5b) mostra o diagrama fasorial desse circuito.

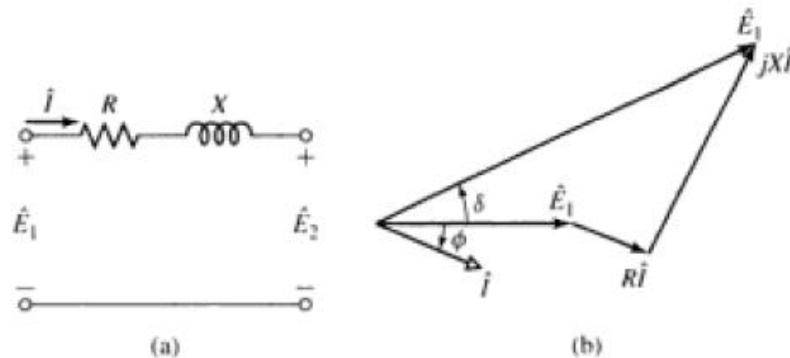


Figura 5. (a) impedância que interconecta duas tensões; (b) diagrama fasorial [2].

Considerando a resistência desprezível, uma vez que $R \ll |Z|$, tem-se que

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta, \quad (2)$$

onde P_1 é a potência no lado da fonte E_1 , P_2 a potência no lado da fonte E_2 , X a reatância indutiva e δ o ângulo de potência. A Eq. (2) é conhecida como característica do ângulo de potência da máquina síncrona [2].

Para a máxima transferência de potência na máquina síncrona, tem-se que

$$P_{1,max} = P_{2,max} = \frac{E_1 E_2}{X} \quad (3)$$

Isso ocorrerá quando $\delta = \pm 90^\circ$. Para δ positivo, tem-se \hat{E}_1 adiantada em relação a \hat{E}_2 , neste caso, a potência será transferida de \hat{E}_1 para \hat{E}_2 . Para δ negativo, tem-se \hat{E}_1 atrasada em relação a \hat{E}_2 , com a potência transferida de \hat{E}_2 para \hat{E}_1 .

Para o caso da máquina síncrona conectada a um sistema externo, tem-se o circuito representativo conforme o da Fig. (6) abaixo. Este circuito representa uma máquina com tensão \hat{E}_{af} e impedância X_s conectada a um sistema externo, representado pelo circuito equivalente de Thévenin, com tensão V_{EQ} e impedância X_{EQ} . A potência recebida pelo sistema, transferida da máquina síncrona, pode ser expressa pela equação

$$P = \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \sin \delta \quad (4)$$

As equações mostradas referem-se a circuitos monofásicos. Para circuitos trifásicos onde E_1 e E_2 forem tensões de fase deve-se multiplicar os valores por 3, para que se obtenha a potência trifásica. Para circuitos trifásicos onde E_1 e E_2 forem tensões de linha, os valores obtidos já contemplam a potência trifásica [2].

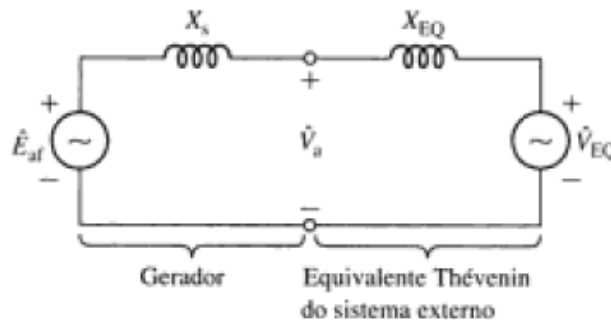


Figura 6. Representação usando um circuito equivalente de uma máquina síncrona conectada a um sistema externo [2].

Um ângulo de potência pouco abaixo de 90° é considerado como ponto de operação ideal, em termos de estabilidade da máquina [2].

3.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PÓLOS SALIENTES

Em uma máquina de pólos salientes, o que determina a direção de magnetização são as protuberâncias dos pólos do campo. Na análise deste tipo de máquina é possível decompor as tensões e correntes em suas componentes segundo os eixos direto e em quadratura [2].

Na análise de diagramas fasoriais de máquinas síncronas, as localizações dos eixos direto e em quadratura podem ser imediatamente determinadas quando se localiza o fasor da tensão gerada \hat{E}_{af} . Sabendo-se que, por definição, o enrolamento de campo produz um fluxo orientado ao eixo direto do rotor, nos diagramas fasoriais a FMM do enrolamento de campo e o fluxo correspondente $\hat{\Phi}_f$ estão direcionados ao eixo direto do rotor. O fasor \hat{E}_{af} é adiantado de 90° em relação ao fluxo $\hat{\Phi}_f$, visto que a tensão interna gerada é proporcional à derivada do fluxo de enrolamento de campo, em relação ao tempo. Como o eixo em quadratura, por convenção, é adiantado de 90° em relação ao eixo direto, pode-se dizer que o *fasor da tensão gerada* \hat{E}_{af} está ao longo do eixo de quadratura [2].

Um diagrama fasorial para uma máquina síncrona de pólos salientes não saturados, operando com fator de potência indutivo, é representado na Fig. (7). Nela, os efeitos dos pólos salientes são considerados ao se decompor a corrente de armadura \hat{I}_a , tanto ao longo do eixo direto (componente \hat{I}_d), quanto ao longo do eixo de quadratura (componente \hat{I}_q). É importante observar que, no caso dos fluxos de reação da armadura, os subscritos d e q não estão referidos à fase temporal das correntes que os produzem, mas sim à sua fase espacial [2].

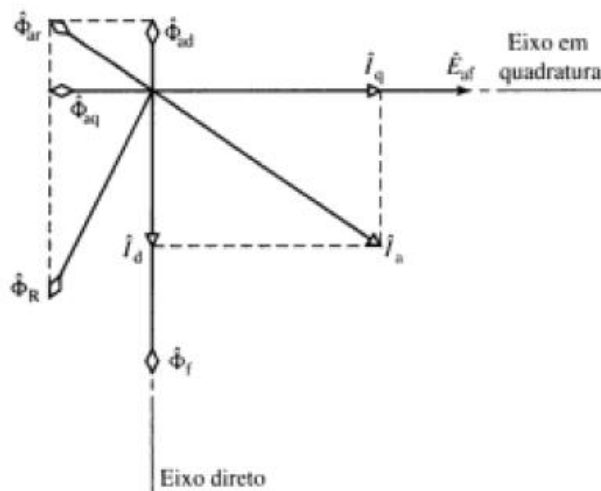


Figura 7. Diagrama fasorial – Máquina síncrona de pólos salientes [2].

Para esse tipo de máquina (não saturada) nota-se que da soma das componentes $\hat{\Phi}_{ad}$ e $\hat{\Phi}_{aq}$ resulta o fluxo de reação da armadura $\hat{\Phi}_{ar}$, assim como da soma de $\hat{\Phi}_{ar}$ com o fluxo de campo $\hat{\Phi}_f$ resulta o fluxo $\hat{\Phi}_R$. Neste caso, a componente $\hat{\Phi}_{ad}$ da fundamental espacial do fluxo de reação da armadura é produzida no eixo direto pela componente \hat{I}_d da corrente de armadura, em quadratura no tempo com a tensão gerada \hat{E}_{af} . Além disso, a componente \hat{I}_q , em fase com a tensão gerada, produz a componente $\hat{\Phi}_{aq}$ da fundamental espacial do fluxo de reação da armadura, que se encontra em quadratura espacial com os pólos do campo [2].

A Fig. (8) apresenta um diagrama fasorial de um gerador síncrono que representa as relações existentes entre as tensões e as correntes. Neste caso, é possível notar que a soma fasorial entre a tensão de terminal \hat{V}_a , a queda de tensão $\hat{I}_a R_a$ na resistência de armadura e as quedas $j\hat{I}_d X_d + j\hat{I}_q X_q$ nas componentes de reatância síncrona é igual à tensão gerada \hat{E}_{af} . Os efeitos indutivos de todas as

componentes espaciais fundamentais dos fluxos, criados pelas correntes de armadura (tanto no eixo direto, quanto em quadratura), são atribuídos às reatâncias síncronas X_d e X_q . Por isso, a partir das reatâncias de magnetização de eixo direto $X_{\phi d}$ e em quadratura $X_{\phi q}$, os efeitos indutivos das ondas de fluxo da reação de armadura podem ser calculados [2].

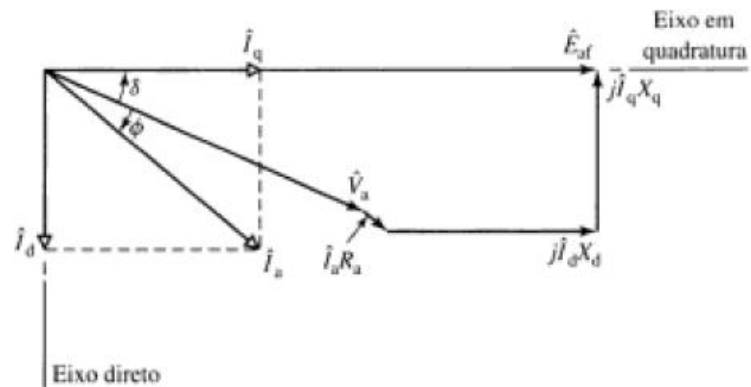


Figura 8. Diagrama fasorial - Gerador síncrono mostrando as relações entre as tensões e as correntes [2].

As reatâncias síncronas de eixo direto e em quadratura são dadas, respectivamente, por [2]:

$$X_d = X_{a1} + X_{\phi d} \quad (5)$$

$$X_q = X_{a1} + X_{\phi q} \quad (6)$$

4. METODOLOGIA

Neste tópico serão expostos os procedimentos empregados durante a execução das práticas experimentais, além dos materiais utilizados em cada uma delas. A seção detalha os métodos seguidos em laboratório para se executar as práticas propostas, durante o processo de definição das mesmas, para validação das propostas.

4.1 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO A VAZIO

Nesta prática propõe-se ao aluno a assimilação prática sobre o comportamento de um gerador síncrono trifásico ao ser acionado por um motor assíncrono que, por sua vez, é controlado por um inversor de frequência.

O motor assíncrono utilizado é quem fornece a energia mecânica para o gerador, desempenhando o papel de uma turbina hidráulica ou eólica, por exemplo. Comparando-se o motor a uma turbina hidráulica, a variação da velocidade do motor pode ser entendida como a variação na vazão de água através da turbina hidráulica, permitindo ao aluno entender os efeitos dessa variação no gerador.

Os dados de placa do gerador síncrono trifásico são: potência de 200W; velocidade de 3000 RPM; tensão de armadura de 200V; corrente de armadura de 1A; tensão de excitação de 200V; corrente de excitação de 0.7A; frequência de 50Hz.

4.1.1 Materiais utilizados

- a) 01 bancada didática WEG;
- b) 01 motor assíncrono trifásico EDIBON (EMT-7);
- c) 01 gerador síncrono trifásico EDIBON (EMT-6);
- d) 01 placa P012 – 03 fusíveis de 16A;
- e) 01 placa P011 – 03 chaves seletoras;
- f) 03 placas P008 – medidor de tensão AC;
- g) 01 placa P009 – inversor de frequência WEG CFW11;
- h) 01 fonte de alimentação DC regulada MINIPA (MPL-1303);
- i) Cabos de conexão.

4.1.2 Procedimentos

A prática iniciou-se com a montagem dos circuitos de alimentação e controle do inversor de frequência e de acionamento do motor assíncrono, de acordo com a Fig. (9) abaixo:

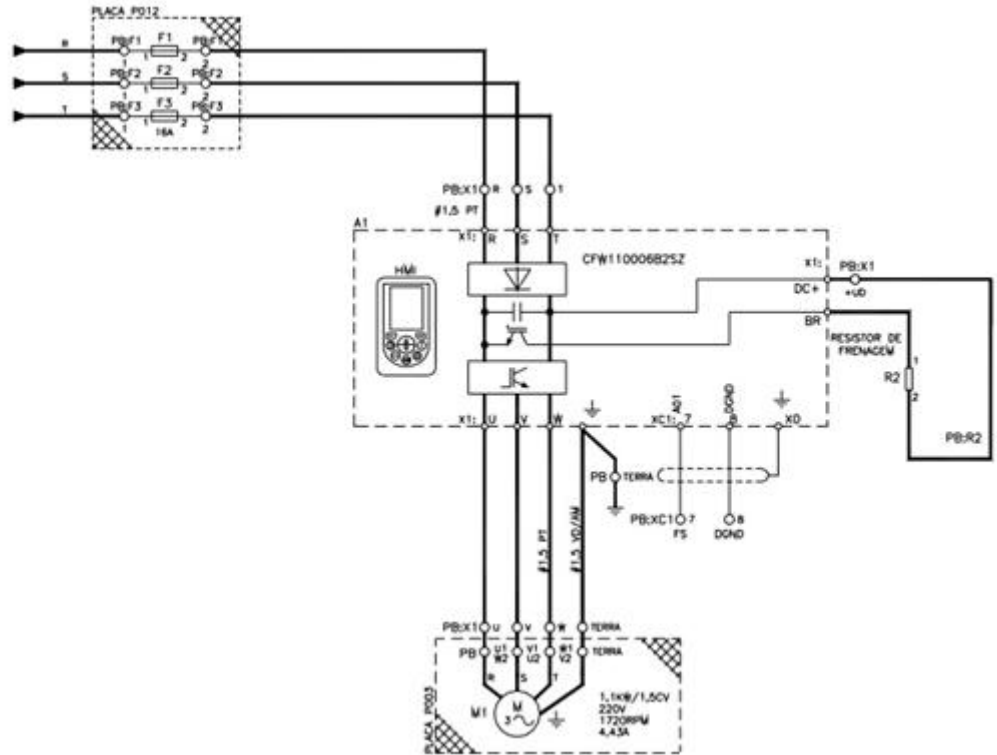


Figura 9. Diagrama de alimentação do inversor de frequência e de acionamento do motor assíncrono [8].

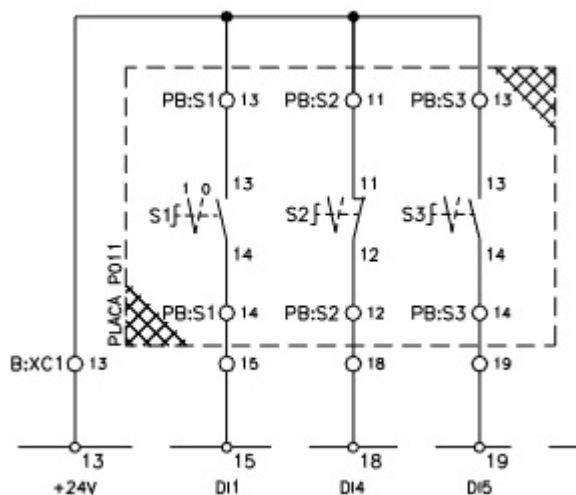


Figura 10. Diagrama de controle de velocidades [8].

O esquema de ligação das chaves seletoras para controle da velocidade está demonstrado na Fig. (10) acima. O inversor de frequência foi programado de modo a estabelecer as velocidades desejadas para o motor durante o experimento,

utilizando a função *Multispeed*. Os comandos programados se encontram detalhados na Tab. (1) abaixo.

Tabela 1. Configuração do inversor de frequência.

Passo	Parâmetro	Descrição	Valor
01	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
02	P0204	Carrega/salva parâmetros	0005
03	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
04	P0220	Seleção fonte LOC/REM	0000
05	P0221	Seleção referência LOC	0008
06	P0223	Seleção giro LOC	0002
07	P0224	Seleção gira/para LOC	0001
08	P0124	Referência 1 Multispeed	0500
09	P0125	Referência 2 Multispeed	2000
10	P0126	Referência 3 Multispeed	1000
11	P0127	Referência 4 Multispeed	2730
12	P0263	Função da entrada DI1	0002
13	P0266	Função da entrada DI4	0013
14	P0267	Função da entrada DI5	0013
15	P0134	Velocidade máxima	2730

Os circuitos de medição das tensões de saída do gerador e de excitação do gerador síncrono foram montados de acordo com a Fig. (11) abaixo.

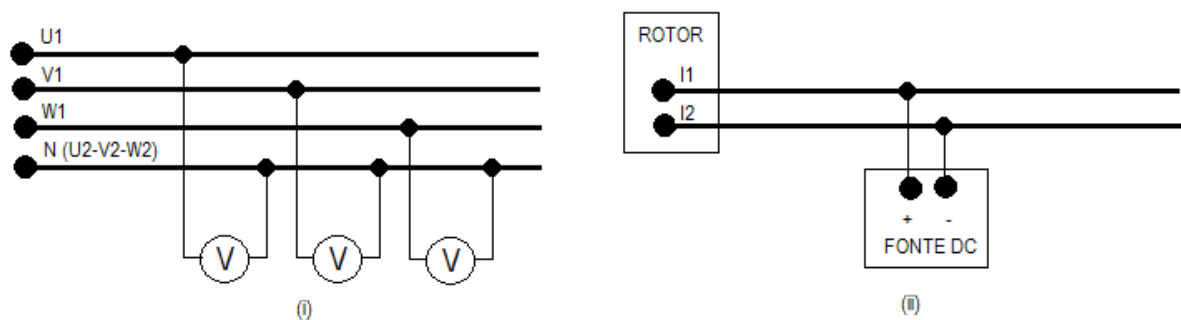


Figura 11. Diagrama de montagem de (i) medição de tensões de saída do gerador e de (ii) excitação do gerador síncrono.

Depois de montados os diagramas e programado corretamente o inversor de frequência, a fonte de alimentação DC foi ligada e regulada em 15V. O sistema foi então ligado, acionando as chaves seletoras, de acordo com a lógica binária programada e demonstrada na Tab. (2) abaixo, de forma a se obter uma velocidade por vez. Foi possível, então, verificar as tensões geradas para cada velocidade do sistema motor/gerador.

Tabela 2. Velocidade *versus* chaves seletoras.

Chave S1	Chave S2	Chave S3	Velocidade (RPM)
0	0	0	0
1	0	0	500
1	0	1	1000
1	1	0	2000
1	1	1	2730

Para permitir uma visualização do comportamento dos conjugados mecânico e eletromecânico, a velocidade 1 do inversor de frequência foi alterada para 100 RPM e o conjunto acionado para trabalhar com essa velocidade.

4.2 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO COM CARGA

Esta prática baseia-se em procedimentos similares aos da prática anterior, porém com o novo objetivo de se analisar o funcionamento do gerador síncrono trifásico diante de carga acoplada. Para análise foram medidos os valores de corrente, com multímetros (trabalhando como amperímetros) conectados em série com os circuitos, e os valores de tensão de fase, com o comum do multímetro (trabalhando como voltímetro) conectado ao neutro do sistema e a ponta de prova medindo os valores das tensões de entrada de cada ramo da carga.

4.2.1 Materiais utilizados

- a) 01 bancada didática WEG;
- b) 01 motor assíncrono trifásico EDIBON (EMT-7);
- c) 01 gerador síncrono trifásico EDIBON (EMT-6);
- d) 01 placa P012 – 03 fusíveis de 16A;
- e) 01 placa P011 – 03 chaves seletoras;
- f) 03 placas P008 – medidor de tensão AC;
- g) 01 placa P009 – inversor de frequência WEG CFW11;
- h) 01 fonte de alimentação DC regulada MINIPA (MPL-1303);
- i) 01 módulo de cargas resistivas, indutivas e capacitivas EDIBON (RCL3R);
- j) 04 multímetros digitais MINIPA (ET-2510);
- k) Cabos de conexão

4.2.2 Procedimentos

Nesta prática foram executados os mesmos procedimentos de montagem da Prática com Gerador Síncrono a Vazio, com exceção dos voltímetros analógicos.

O detalhamento da programação do inversor de frequência segue na Tab. (3) abaixo. A fonte de alimentação DC foi ligada e regulada novamente em 15V.

Tabela 3. Configuração do inversor de frequência.

Passo	Parâmetro	Descrição	Valor
01	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
02	P0204	Carrega/salva parâmetros	0005
03	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
04	P0220	Seleção fonte LOC/REM	0000
05	P0221	Seleção referência LOC	0008
06	P0223	Seleção giro LOC	0002
07	P0224	Seleção gira/para LOC	0001
08	P0124	Referência 1 Multspeed	0500
09	P0263	Função da entrada DI1	0002
10	P0266	Função da entrada DI4	0013
11	P0267	Função da entrada DI5	0013

Para estimular o raciocínio dos alunos, ao invés de diagramas esquemáticos detalhados serão apresentados apenas esquemas de montagem simplificados, como mostrado na Fig. (12). A idéia é que os alunos discutam entre si a forma de ligação correta, partindo do que foi pedido na prática.

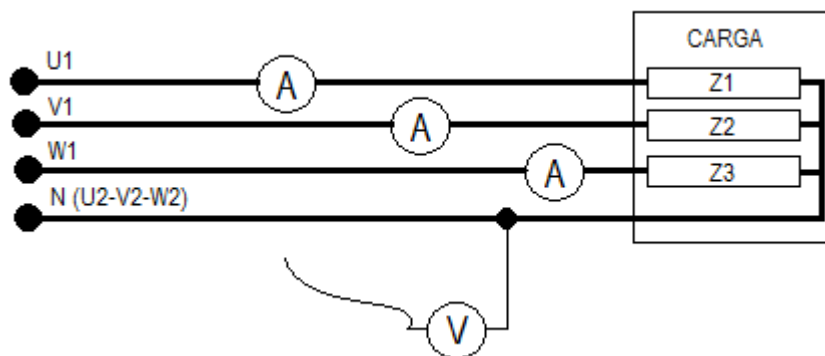


Figura 12. Esquema de montagem de carga.

Quanto às cargas, primeiramente foi inserida à saída do gerador uma carga puramente resistiva balanceada, com resistências de 300 ohms.

Para a segunda carga foram utilizadas cargas puramente resistivas, desbalanceadas, com os valores de $R_1 = 150$ ohms, $R_2 = 300$ ohms e $R_3 = 75$ ohms.

Na terceira carga foram montadas cargas RLC (resistiva-indutiva-capacitiva) em série, balanceadas, utilizando resistores de 300 ohms, indutores de 236 mH e capacitores de 7 μF .

Por fim, o mesmo procedimento com cargas RLC foi executado, utilizando agora cargas desbalanceadas, montando para a impedância 1 o circuito com $R_1 = 150$ ohms, $L_1 = 78$ mH e $C_1 = 7$ μF ; para a impedância 2 o circuito com $R_2 = 300$ ohms, $L_2 = 236$ mH e $C_2 = 7$ μF ; para a impedância 3 o circuito com $R_3 = 75$ ohms, $L_3 = 193$ mH e $C_3 = 7$ μF .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão expostos os resultados obtidos dos experimentos realizados, com detalhamento dos valores medidos e dos cálculos utilizados.

5.1 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO A VAZIO

A montagem da prática foi realizada conforme descrito no item 4.1.2 e seu resultado pode ser visto na Fig. (13) abaixo. Nela é possível reconhecer os materiais utilizados, sua disposição, bem como o acoplamento entre motor e gerador.



Figura 13. Prática com gerador síncrono a vazio.

Os valores de tensão obtidos estão demonstrados na Tab. (4) abaixo.

Tabela 4. Valores de tensão medidos no gerador

	500 RPM	1000 RPM	2000 RPM	2730 RPM
U1	40 V	85 V	170 V	225 V
V1	40 V	85 V	170 V	225 V
W1	40 V	85 V	170 V	225 V

Pelos dados apresentados, observa-se que, sem carga, esse gerador apresenta na saída valores de tensão muito altos se comparados com a tensão de excitação utilizada.

Na parte final da prática será solicitado ao aluno que responda a algumas perguntas. Espera-se que as respostas sejam próximas e compatíveis com o que segue:

a) Cálculo do número de pólos do gerador.

A partir dos dados de placa do gerador é possível calcular seu número de pólos utilizando a equação

$$N = (120f)/\text{pólos}, \quad (7)$$

resultando em 2 pólos, uma vez que $N = 3000$ e $f = 50$.

b) Tipo de ligação do estator.

O estator do gerador está ligado em 'estrela'. Os pontos U2, V2 e W2 estão em curto-circuito, fazendo com que haja um ponto em comum entre as três impedâncias do estator, característica que configura uma ligação em 'estrela'.

c) Identificação das tensões de saída.

As tensões medidas são de fase, uma vez que as medidas são feitas entre fase e neutro.

d) Cálculo da tensão de linha com gerador a 2730 RPM.

A tensão de fase a 2730 RPM é de 225 VAC;

Para gerador configurado em estrela temos que

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_f,$$

sendo assim, temos que $V_L = \sqrt{3} \cdot 225 \rightarrow V_L = 390 \text{ V}$

e) Ativação do gerador a 100 RPM, sem excitação inicial.

O eixo não gira, sendo necessário ajudar o conjunto aplicando força mecânica externa ao eixo do gerador, girando o eixo com a mão. Nessa rotação o motor não consegue transpor a inércia do gerador, que se opõe ao giro do eixo. A força externa é necessária apenas na partida.

f) Aumentar a tensão da fonte de excitação.

Com o gerador ativado a 100 RPM, à medida que o rotor é excitado, o conjugado eletromecânico interage com o conjugado mecânico, fazendo com que o eixo desacelere, até parar totalmente.

5.2 PRÁTICA COM GERADOR SÍNCRONO COM CARGA

A montagem da prática foi realizada conforme descrito no item 4.2.2 e seu resultado pode ser visto na Fig. (14) abaixo. Nela é possível reconhecer os materiais utilizados e sua disposição.

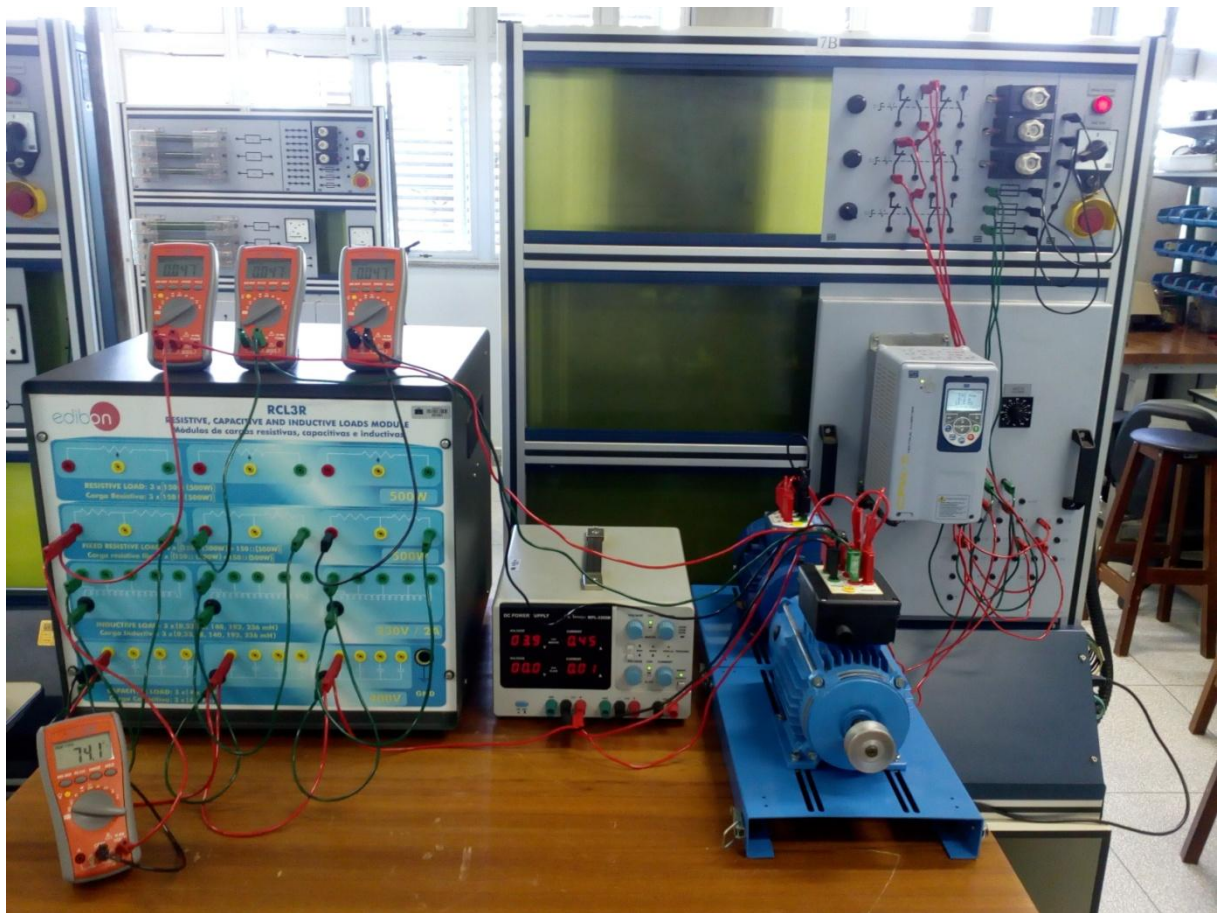


Figura 14. Prática com gerador síncrono com carga.

Os valores de tensões e correntes obtidos estão demonstrados na Tab. (5) abaixo. Nessa tabela, C1 representa a carga resistiva balanceada, C2 a carga resistiva desbalanceada, C3 a carga RLC balanceada e C4 a carga RLC desbalanceada.

Tabela 5. Valores de tensões e correntes medidos na carga.

	C1	C2	C3	C4
U1	10,75 V	5,36 V	74,00 V	80,70 V
V1	10,83 V	7,18 V	74,70 V	80,50 V
W1	10,87 V	3,33 V	74,90 V	81,80 V
I_u	0,035 A	0,036 A	0,048 A	0,052 A
I_v	0,036 A	0,024 A	0,048 A	0,051 A
I_w	0,036 A	0,045 A	0,048 A	0,053 A

Para calcular as correntes e compará-las aos valores medidos deve-se calcular a impedância equivalente de cada ramo da carga.

Para as cargas resistivas, a impedância equivalente é igual à resistência.

CARGA RESISTIVA BALANCEADA:

$$Z = 300 \text{ ohms}$$

$$I = V/Z$$

$$I_u = 10,75/300 = 0,036 \text{ A}$$

$$I_v = 10,83/300 = 0,036 \text{ A}$$

$$I_w = 10,87/300 = 0,036 \text{ A}$$

Os valores teóricos e práticos são compatíveis.

CARGA RESISTIVA DESBALANCEADA

$$Z1 = 150 \text{ ohms}$$

$$Z2 = 300 \text{ ohms}$$

$$Z3 = 75 \text{ ohms}$$

$$I_u = 5,36/150 = 0,036 \text{ A}$$

$$I_v = 7,18/300 = 0,024 \text{ A}$$

$$I_w = 3,33/75 = 0,044 \text{ A}$$

Os valores teóricos e práticos são compatíveis.

Para as cargas RLC, o cálculo da impedância equivalente deve ser feito por etapas:

Etapa 1: calcular a frequência do gerador a 500 RPM

Utilizando a Eq. (7) e considerando que $N = 500$ e pólos = 2, temos uma frequência de 8,33 Hz.

Etapa 2: calcular a velocidade angular ω

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 52,34 \text{ rad/s}$$

Etapa 3: calcular a impedância equivalente de cada ramo

$$Z = R + j(X_L + X_C)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$X_L = j\omega L$$

$$X_C = -j 1/(\omega C)$$

$$Z = R + j [\omega L - 1/(\omega C)]$$

Etapa 4: calcular a corrente em cada ramo

CARGA RLC BALANCEADA

$$R = 300 \text{ ohms}$$

$$X_L = j (52,34 * 236 * 10^{-3}) = j 12,35 \text{ ohms}$$

$$X_C = -j [1/(52,34 * 7 * 10^{-6})] = -j 2729,41 \text{ ohms}$$

$$X = j (12,35 - 2729,41) = -j 2717,06 \text{ ohms}$$

$$Z = 300 - j 2717,06$$

$$Z = \sqrt{[(300)^2 + (2717,06)^2]} = 2733,57 \text{ ohms}$$

$$I_u = 74/2733,57 = 0,027 \text{ A}$$

$$I_v = 74,7/2733,57 = 0,027 \text{ A}$$

$$I_w = 74,9/2733,57 = 0,027 \text{ A}$$

CARGA RLC DESBALANCEADA

Ramo U

$$R = 150 \text{ ohms}$$

$$X_L = j (52,34 * 78 * 10^{-3}) = j 4,08 \text{ ohms}$$

$$X_C = -j [1/(52,34 * 7 * 10^{-6})] = -j 2729,41 \text{ ohms}$$

$$X = j (4,08 - 2729,41) = -j 2725,33 \text{ ohms}$$

$$Z = 150 - j 2725,33$$

$$Z = \sqrt{[(150)^2 + (2725,33)^2]} = 2729,45 \text{ ohms}$$

$$I_u = 80,7/2729,45 = 0,030 \text{ A}$$

Ramo V

$$R = 300 \text{ ohms}$$

$$X_L = j (52,34 \cdot 236 \cdot 10^{-3}) = j 12,35 \text{ ohms}$$

$$X_C = -j [1/(52,34 \cdot 7 \cdot 10^{-6})] = -j 2729,41 \text{ ohms}$$

$$X = j (12,35 - 2729,41) = -j 2717,06 \text{ ohms}$$

$$Z = 300 - j 2717,06$$

$$Z = \sqrt{[(300)^2 + (2717,06)^2]} = 2733,57 \text{ ohms}$$

$$I_v = 80,5/2733,57 = 0,029 \text{ A}$$

Ramo W

$$R = 75 \text{ ohms}$$

$$X_L = j (52,34 \cdot 193 \cdot 10^{-3}) = j 10,10 \text{ ohms}$$

$$X_C = -j [1/(52,34 \cdot 7 \cdot 10^{-6})] = -j 2729,41 \text{ ohms}$$

$$X = j (10,10 - 2729,41) = -j 2719,31 \text{ ohms}$$

$$Z = 75 - j 2719,31$$

$$Z = \sqrt{[(75)^2 + (2719,31)^2]} = 2720,34 \text{ ohms}$$

$$I_w = 81,8/2720,34 = 0,030 \text{ A}$$

Os valores teóricos e práticos apresentaram alguma divergência, que pode ser atribuída, entre outras coisas, à precisão dos equipamentos utilizados. O multímetro, por exemplo, é especificado para medir tensões e correntes em frequências de 50 a 500 Hz.

5.3 EXECUÇÃO DAS PRÁTICAS

A Prática com Gerador Síncrono com Carga, utilizando carga RLC balanceada, foi executada por cinco estudantes da Universidade de Brasília, sendo: (A1) estudante de mestrado da UnB, com graduação em Engenharia de Energia (FGA), já tendo cursado a disciplina Conversão Eletromecânica de Energia; (A2, A3, A4) estudantes de Engenharia de Energia (FGA), já tendo cursado a disciplina Conversão Eletromecânica de Energia; (A5) estudante de Engenharia de Energia (FGA), cursando a disciplina Conversão Eletromecânica de Energia.

Para execução da prática, as montagens acessórias já estavam prontas, ficando a cargo dos estudantes a programação do inversor de frequência, o arranjo dos elementos para composição da carga RLC, a conexão da carga ao gerador e a conexão dos multímetros ao sistema para medição das correntes e tensões.

Após a execução da prática, foi solicitado aos estudantes que respondessem uma avaliação rápida, com o seguinte conteúdo:

MATERIAIS UTILIZADOS NA PRÁTICA

1. Insuficientes (a quantidade de material disponível para a prática é inferior à quantidade necessária, sendo necessário realizar arranjos para que se cumpra a tarefa);
2. Suficientes, em **mau** estado (a quantidade de material disponível para a prática é suficiente, mas alguns equipamentos encontram-se danificados ou em mau estado de conservação);
3. Suficientes, em **bom** estado (a quantidade de material disponível para a prática é suficiente e os equipamentos encontram-se em bom estado de conservação);

MONTAGEM DA PRÁTICA

1. Dificuldade alta (a montagem requer um alto conhecimento e atenção extrema para os detalhes das conexões entre os materiais, tornando a prática difícil de ser executada);
2. Dificuldade mediana (a montagem requer um bom conhecimento e atenção para os detalhes das conexões entre os materiais, deixando a prática com um nível médio de dificuldade);
3. Fácil (a montagem requer pouco conhecimento e pouca atenção para os detalhes das conexões entre os materiais, tornando a prática fácil de ser executada);

TEMPO DE EXECUÇÃO DA PRÁTICA

1. Insuficiente (a prática requer um tempo maior do que o horário de uma aula para ser executada);

2. Suficiente, **sem** folga (a prática pode ser executada no horário de uma aula, não sendo possível realizar outras tarefas ou haver revezamento de grupos);
3. Suficiente, **com** folga (a prática pode ser executada no horário de uma aula, sendo possível realizar outras tarefas ou haver revezamento de grupos);

RELEVÂNCIA DA PRÁTICA PARA A DISCIPLINA CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

1. Baixa (a prática **não permite** aquisição de novos conhecimentos **nem fixação** de conhecimentos adquiridos na teoria);
2. Média (a prática **não permite** aquisição de novos conhecimentos mas **fixa** conhecimentos adquiridos na teoria);
3. Alta (a prática **permite** aquisição de novos conhecimentos e **fixa** conhecimentos adquiridos na teoria);

Suas percepções sobre a prática podem ser verificadas na Tab. (6) a seguir.

Tabela 6. Avaliação dos estudantes sobre a prática realizada

	A1	A2	A3	A4	A5
Materiais	3	3	3	3	---
Montagem	2	1	2	3	1
Tempo	2	3	3	2	---
Relevância	3	3	3	3	3

A percepção destes alunos acerca da prática realizada é de que:

1. Os materiais relacionados para a prática são suficientes e em bom estado de conservação;
2. A montagem está em um nível de dificuldade entre mediano e alto, exigindo que o estudante tenha um bom conhecimento e atenção para os detalhes das conexões executadas;
3. O tempo para realização da prática é suficiente, mas pode não permitir a realização de outras tarefas pelo grupo ou o revezamento dos grupos, dessa forma, talvez seja interessante que as turmas tenham dois grupos por bancada, por horário de aula;

4. A prática é relevante para a disciplina Conversão Eletromecânica de Energia, pois permite aquisição de novos conhecimentos e fixa conhecimentos adquiridos na teoria.

6. CONCLUSÕES

A máquina síncrona é um dos tipos de máquinas eletromecânicas mais importantes que existem, sendo empregadas tanto na produção de energia elétrica em hidrelétricas, termelétricas, eólicas, etc., quanto nas indústrias de transformação.

O uso desse tipo de máquina é justificado por fatores como: baixo custo inicial; alto rendimento; melhora da qualidade da energia, com correção do fator de potência; baixa corrente de partida; velocidade constante mesmo em condições de sobrecarga; simplicidade de operação.

O estudo da máquina síncrona é extremamente importante para o estudante de Engenharia de Energia. Conhecer seus fundamentos teóricos, aliados a práticas que simulem situações reais, fortalecerá seu conhecimento acadêmico e o aperfeiçoará para atuação no mercado de trabalho.

Este trabalho resultou na elaboração de roteiros experimentais para a prática em laboratório com máquinas síncronas, utilizando os equipamentos do laboratório de Eletricidade.

Dentre outros equipamentos, foi utilizada a máquina síncrona Edibon, modelo EMT6, tipo motor-alternador trifásico, cujos dados nominais são: Potência de 200W; Velocidade de 3.000RPM; Frequência de 50Hz; Tensão de excitação de 200V; Corrente de excitação de 0.7A; Tensão de armadura de 200V; Corrente de armadura de 1A.

As práticas foram propostas operando a máquina síncrona como gerador, realizando ensaios a vazio e com cargas (resistivas, indutivas e capacitivas) e medições de tensão terminal e correntes de armadura. A Prática com Gerador Síncrono com Carga (RLC balanceada) foi executada por estudantes da UnB que a avaliaram como sendo relevante para a disciplina Conversão Eletromecânica de Energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NASCIMENTO JÚNIOR, G. C. **Máquinas Elétricas: teoria e ensaios**. 4 Ed., São Paulo: Érica, 2011.
- [2] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. Tradução Anatólio Laschuk. 6 Ed., Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [3] WEG. **Motores Síncronos**. Artigo técnico, 2003. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>>. Acesso em setembro de 2015.
- [4] WEG. **Características e especificações de geradores**. Artigo técnico, 2006. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em outubro de 2015.
- [5] CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. 4 Ed., New York: McGraw-Hill, 2005.
- [6] REZEK, A. J. J. **Fundamentos básicos de máquinas elétricas: teoria e ensaios**. Rio de Janeiro: Synergia; Itajubá: Acta, 2011.
- [7] GE. **Motores Síncronos**. Nota técnica 02, 2000. Disponível em: <<https://www.geindustrial.com.br/download/artigos/nt02.pdf>>. Acesso em outubro de 2015.
- [8] CABRAL, G. M. B. **Prática com servoacionamento e inversor de frequência para execução no laboratório de eletricidade aplicada da FGA-UNB**. Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

APÊNDICES

		Página
Apêndice A	Prática com gerador síncrono a vazio	30
Apêndice B	Prática com gerador síncrono com carga	34

APÊNDICE A – Prática com gerador síncrono a vazio

1. OBJETIVOS

- 1.1. Compreender o funcionamento de um gerador síncrono trifásico;
- 1.2. Analisar as tensões geradas;

2. MATERIAL UTILIZADO

- 2.1. 01 bancada didática WEG;
- 2.2. 01 placa P012 – 03 fusíveis de 16A;
- 2.3. 01 placa P011 – 03 chaves seletoras;
- 2.4. 03 placas P008 – medidor de tensão AC;
- 2.5. 01 placa P009 – inversor de frequência WEG CFW11;
- 2.6. 01 fonte de alimentação DC regulada MINIPA (MPL-1303);
- 2.7. 01 motor assíncrono trifásico EDIBON (EMT-7);
- 2.8. 01 gerador síncrono trifásico EDIBON (EMT-6);
- 2.9. Cabos de conexão;

3. PROCEDIMENTOS

- 3.1. Acoplar o motor assíncrono ao gerador síncrono, conforme Fig. A.1 abaixo:

Para o acoplamento, verificar inicialmente a posição entre as máquinas: o acoplamento do eixo do motor deve ser encaixado perfeitamente ao acoplamento do eixo do gerador, conforme destacado em 1 na Fig. A.1. As bases metálicas das máquinas também devem estar na posição correta, de forma que a trava de segurança seja acionada corretamente, permitindo o travamento entre as peças, conforme destacado em 2 na Fig. A.1.

Verificar, ainda, se as máquinas estão presas firmemente às bases metálicas. Cada máquina utiliza quatro parafusos para essa função. Caso estejam com alguma folga, deve-se realizar o aperto dos parafusos na parte inferior da base metálica, até que a máquina esteja firme.

Em hipótese alguma as máquinas devem ser acionadas sem que os procedimentos acima tenham sido executados corretamente. Durante realização da prática deve-se tomar muito cuidado com a ponta do eixo do gerador que ficou livre, para evitar acidentes.



Figura A.1. Acoplamento entre motor assíncrono e gerador síncrono.

- 3.2. Verificar a placa de dados do gerador síncrono e transcrever as informações para a Tab. A.1 abaixo:

Tabela A.1. Dados de placa do gerador síncrono

Referência		Frequência	
Potência		Velocidade	
V de armadura		I de armadura	
V de excitação		I de excitação	

- 3.3. Montar os circuitos de alimentação do inversor de frequência e de acionamento do motor assíncrono conforme Prática com Inversor de Frequência.
- 3.4. Montar o circuito de medição das tensões de saída do gerador e de excitação do gerador conforme Fig. A.2 abaixo.
- 3.5. Verificar todas as conexões e certificar que os cabos de conexão não estão muito próximos ou encostando nos eixos das máquinas.
- 3.6. Solicitar ao professor e/ou técnico do laboratório a verificação de toda a montagem, antes de energizar a bancada. Após aprovação das montagens, proceder com a energização da bancada.

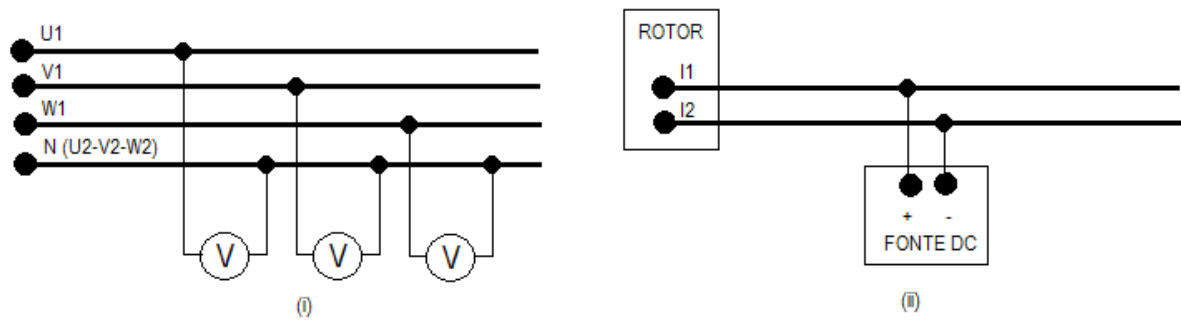


Figura A.2. Diagrama de montagem de (i) medição de tensões de saída do gerador e de (ii) excitação do gerador síncrono.

3.7. Configurar o inversor de frequência seguindo os passos indicados na Tab. A.2 abaixo.

Tabela A.2. Configuração do inversor de frequência [8]

Passo	Parâmetro	Descrição	Valor
01	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
02	P0204	Carrega/salva parâmetros	0005
03	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
04	P0220	Seleção fonte LOC/REM	0000
05	P0221	Seleção referência LOC	0008
06	P0223	Seleção giro LOC	0002
07	P0224	Seleção gira/para LOC	0001
08	P0124	Referência 1 Multspeed	0500
09	P0125	Referência 2 Multspeed	2000
10	P0126	Referência 3 Multspeed	1000
11	P0127	Referência 4 Multspeed	2730
12	P0263	Função da entrada DI1	0002
13	P0266	Função da entrada DI4	0013
14	P0267	Função da entrada DI5	0013
15	P0134	Velocidade máxima	2730

3.8. Verificar a Tabela A.3 abaixo para conhecer as velocidades a partir da combinação das chaves seletoras.

Tabela A.3. Velocidade *versus* chaves seletoras [8]

Chave S1	Chave S2	Chave S3	Velocidade (RPM)
0	0	0	0
1	0	0	500
1	0	1	1000
1	1	0	2000
1	1	1	2730

3.9. Ligar a fonte de alimentação DC e regule-a em 15V.

- 3.10. Acionar as chaves seletoras, de forma a obter uma velocidade por vez, verificar as tensões medidas e preencher a Tab. A.4 abaixo.

Tabela A.4. Valores de tensão medidos no gerador

	500 RPM	1000 RPM	2000 RPM	2730 RPM
V1				
V2				
V3				

- 3.11. Entrar na programação do inversor e alterar o parâmetro P0124 para a velocidade de 100 RPM.
- 3.12. A partir do experimento realizado, responder as perguntas a seguir:
- 3.12.1. Calcular o número de pólos do gerador.
- 3.12.2. O estator do gerador está ligado em 'estrela' ou 'triângulo'? Comentar.
- 3.12.3. As tensões V1, V2 e V3 medidas são tensões de linha ou de fase?
- 3.12.4. Calcular a tensão de linha com o gerador a 2730 RPM.
- 3.12.5. Regular a tensão da fonte DC para 0V, em seguida acionar a combinação de chaves para ativar o conjunto a 100 RPM. Explicar o que acontece.
- 3.12.6. Após o gerador atingir a rotação programada, aumentar a tensão da fonte DC. Explicar o que acontece.

APÊNDICE B – Prática com gerador síncrono com carga

1. OBJETIVOS

- 1.1. Compreender o funcionamento de um gerador síncrono trifásico com carga acoplada;
- 1.2. Analisar as tensões e correntes geradas;

2. MATERIAL UTILIZADO

- 2.1. 01 bancada didática WEG;
- 2.2. 01 placa P012 – 03 fusíveis de 16A;
- 2.3. 01 placa P011 – 03 chaves seletoras;
- 2.4. 01 placa P009 – inversor de frequência WEG CFW11;
- 2.5. 01 fonte de alimentação DC regulada MINIPA (MPL-1303);
- 2.6. 01 motor assíncrono trifásico EDIBON (EMT-7);
- 2.7. 01 gerador síncrono trifásico EDIBON (EMT-6);
- 2.8. 01 módulo de cargas resistivas, capacitivas e indutivas EDIBON (RCL3R);
- 2.9. 04 multímetros digitais MINIPA (ET-2510);
- 2.10. Cabos de conexão;

3. PROCEDIMENTOS

- 3.1. Executar os mesmos procedimentos de montagem da Prática com Gerador Síncrono a Vazio, com exceção dos voltímetros analógicos. Durante realização da prática deve-se tomar muito cuidado com a ponta do eixo do gerador que ficou livre, para evitar acidentes, além dos demais cuidados apontados na prática citada.
- 3.2. Verificar todas as conexões e certificar que os cabos de conexão não estão muito próximos ou encostando nos eixos das máquinas.
- 3.3. Solicitar ao professor e/ou técnico do laboratório a verificação de toda a montagem, antes de energizar a bancada. Após aprovação das montagens, proceder com a energização da bancada.
- 3.4. Montar os circuitos de alimentação do inversor de frequência e de acionamento do motor assíncrono conforme Prática com Inversor de Frequência.

3.5. Configurar o inversor de frequência seguindo os passos indicados na Tab. B.1 abaixo:

Tabela B.1. Configuração do inversor de frequência [8]

Passo	Parâmetro	Descrição	Valor
01	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
02	P0204	Carrega/salva parâmetros	0005
03	P0000	Acesso aos parâmetros	0005
04	P0220	Seleção fonte LOC/REM	0000
05	P0221	Seleção referência LOC	0008
06	P0223	Seleção giro LOC	0002
07	P0224	Seleção gira/para LOC	0001
08	P0124	Referência 1 Multspeed	0500
09	P0263	Função da entrada DI1	0002
10	P0266	Função da entrada DI4	0013
11	P0267	Função da entrada DI5	0013

- 3.6. Regular a fonte de alimentação em 15 VDC.
- 3.7. Para os acionamentos, utilizar somente a chave S1. As chaves S2 e S3 devem ser mantidas no estado 0.
- 3.8. Montar a carga puramente resistiva balanceada ($R1 = R2 = R3 = 300$ ohms) à saída do gerador, conforme diagrama abaixo:

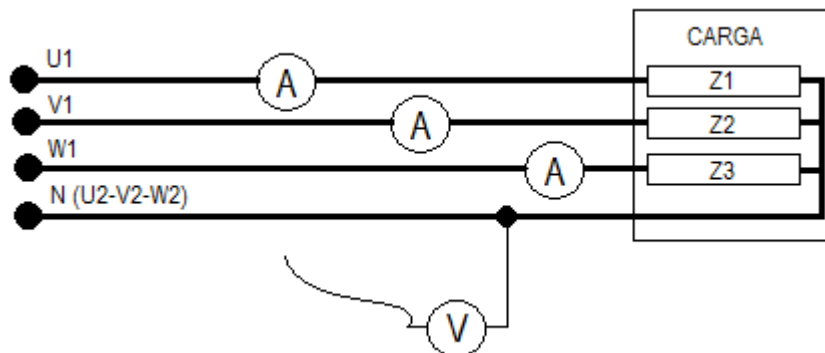


Figura B.1. Esquema de montagem de carga

- 3.9. Acionar a chave S1, para velocidade de 500 RPM, e preencher a tabela B.2 abaixo com os valores medidos. Calcular as correntes e comparar com valores medidos.

Tabela B.2. Valores medidos de tensões e correntes

U1	V1	W1	I_u	I_v	I_w

- 3.10. Repetir a montagem acima, utilizando os valores de $R1 = 150$ ohms, $R2 = 300$ ohms, $R3 = 75$ ohms, simulando uma carga resistiva desbalanceada. Acionar a chave S1, para velocidade de 500 RPM, e preencher a tabela B.3 abaixo com os valores medidos. Calcular as correntes e comparar com valores medidos.

Tabela B.3. Valores medidos de tensões e correntes

U1	V1	W1	I_u	I_v	I_w

- 3.11. Montar a carga resistiva-indutiva-capacitiva (RLC) em série balanceada à saída do gerador, conforme diagrama acima. Utilizar $R = 300$ ohms, $L = 236$ mH, $C = 7 \mu\text{F}$.
- 3.12. Acionar a chave S1, para velocidade de 500 RPM, e preencher a tabela B.4 abaixo com os valores medidos. Calcular as correntes e comparar com valores medidos.

Tabela B.4. Valores medidos de tensões e correntes

U1	V1	W1	I_u	I_v	I_w

- 3.13. Repetir a montagem acima, simulando carga RLC desbalanceada, utilizando os valores de $Z1 = (150 \text{ ohms} + 78 \text{ mH} + 7 \mu\text{F})$, $Z2 = (300 \text{ ohms} + 236 \text{ mH} + 7 \mu\text{F})$, $Z3 = (75 \text{ ohms} + 193 \text{ mH} + 7 \mu\text{F})$. Acionar a chave S1, para velocidade de 500 RPM, e preencher a tabela B.5 abaixo com os valores medidos. Calcular as correntes e comparar com valores medidos.

Tabela B.5. Valores medidos de tensões e correntes

U1	V1	W1	I_u	I_v	I_w