



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JORDY PEREIRA FRANÇA

**INFLUÊNCIA DE CARGAS RESIDENCIAIS NO PERFIL
TENSÃO-FREQUÊNCIA DO GERADOR DE INDUÇÃO NA
CONEXÃO FUKAMI**

UBERLÂNDIA-MG

2019

JORDY PEREIRA FRANÇA

**INFLUÊNCIA DE CARGAS RESIDENCIAIS NO PERFIL
TENSÃO-FREQUÊNCIA DO GERADOR DE INDUÇÃO NA
CONEXÃO FUKAMI**

Trabalho apresentado como requisito
parcial de avaliação na disciplina de
Trabalho de Conclusão de Curso do
Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

UBERLÂNDIA-MG

2019

JORDY PEREIRA FRANÇA

**INFLUÊNCIA DE CARGAS RESIDENCIAIS NO PERFIL
TENSÃO-FREQUÊNCIA DO GERADOR DE INDUÇÃO NA
CONEXÃO FUKAMI**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

Prof. Dr. Fernando Bento Silva

Prof. Dr. Adélio José de Moraes

Uberlândia-Mg, _____, de _____ de 2019

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me guiado desde o princípio.

Aos meus pais Eliane e Amauri pelo amor incondicional, pelo carinho, pela paciência e por terem permitido que eu chegasse até aqui.

À minha irmã Nathane por ter sido meu exemplo a seguir dentro da faculdade, por sempre acreditar em mim e me motivar a nunca desistir dos meus sonhos.

À minha namorada Manuella, que nesta reta final, me deu fôlego para que eu conseguisse alcançar meus objetivos.

À minha avó e aos demais familiares por toda confiança e amor retribuído.

Aos Professores Dr. Geraldo Caixeta de Guimarães, Dr. Fernando Bento Silva e Dr. Adélio José de Moraes por terem dado todo o suporte necessário para a execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, demais professores, técnicos administrativos e ao Movimento Empresa Júnior por terem contribuído para minha formação intelectual.

Aos amigos que conheci e aos que sempre estiveram comigo, por todo o companheirismo e noites mal dormidas.

“Tudo quanto vier à mão, faze-o conforme as tuas forças...”

Eclesiastes 9:10

RESUMO

Devido à crise energética ocorrida em 2015 e às suas consequências, como o racionamento de energia e o aumento das tarifas, consumidores de várias partes do país tem optado por utilizar geradores portáteis como por exemplo, para situações emergenciais ou operação isolada em horário de ponta. Entretanto, as soluções tradicionais utilizadas, tais como geração síncrona em grupos geradores à diesel têm enfrentado barreiras devido às características das máquinas, que exigem custo de aquisição alto e manutenções frequentes, diferentemente da geração assíncrona, cujo valor é aproximadamente 50% deste, além de melhores características devido ao modelo do rotor em gaiola de esquilo. Portanto, uma alternativa mais barata e robusta que surge é o uso de geradores de indução de gaiola de esquilo auto excitado na conexão Fukami, que consistem em capacitores conectados nos enrolamentos do estator, a fim de suprir a potência reativa que a máquina demanda. Dessa forma, a regulação de tensão, que em geradores de indução é pobre, melhora, e a frequência fica mais controlada ao alimentar cargas variáveis, que são comuns em ambientes residenciais.

Palavras-Chave: gerador de indução em gaiola de esquilo auto excitado, Fukami, regulação de tensão.

ABSTRACT

Due to the energy crisis in 2015 and its consequences, such as energy rationing and rising tariffs, consumers in various parts of the country have chosen to use portable generators such as for emergencies or isolated operation at peak times. However, the traditional solutions used, such as synchronous generation in diesel generator sets, have faced barriers due to the characteristics of the machines, which requires high acquisition costs and frequent maintenance, unlike asynchronous generation, whose value is approximately 50% of this, besides better characteristics due to the model of the rotor in squirrel cage. Therefore, a cheaper and more robust alternative that arises is the use of self-excited squirrel cage induction generators in the Fukami connection, which consists of capacitors connected to the stator windings in order to supply the reactive energy that the machine demands. In this way, voltage regulation, which in induction generators is poor, improves, and frequency becomes more controlled when feeding variable loads, which are common in residential environments.

Keywords: self-excited induction generator in squirrel cage, Fukami, voltage regulation

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ROTOR DE POLOS LISOS [5].....	16
FIGURA 2 - ROTOR DE PÓLOS SALIENTES [5].....	16
FIGURA 3 - MÁQUINA SÍNCRONA COM ROTOR DE PÓLOS LISOS [8].....	17
FIGURA 4 - BOBINAS DE UM GERADOR SÍNCRONO, POSICIONADAS A 120° ENTRE SI [8].....	17
FIGURA 5 – EIXO DOS CAMPOS MAGNÉTICOS DO ROTOR E ESTATOR NA MÁQUINA SÍNCRONA.....	18
FIGURA 6 - ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO [9].....	19
FIGURA 7 - ROTOR BOBINADO [9].....	20
FIGURA 8 - MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO [4]	21
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS BOBINAS NO ESTATOR E NO ROTOR [11]	22
FIGURA 10 - EIXO DOS CAMPOS MAGNÉTICOS DO ROTOR E ESTATOR NA MÁQUINA DE INDUÇÃO	22
FIGURA 11 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES À MÁQUINA DE INDUÇÃO [2].....	24
FIGURA 12 - CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E LINHA DE CARGA DE CAPACITORES NO GERADOR DE INDUÇÃO [12].....	25
FIGURA 13 - REGULAÇÃO DE TENSÃO NO GERADOR DE INDUÇÃO [12]	27
FIGURA 14 - ESQUEMA DA CONEXÃO FUKAMI EM UM GERADOR DE INDUÇÃO [14]	28
FIGURA 15 - CIRCUITO DE PRÉ-EXCITAÇÃO EM UM GERADOR DE INDUÇÃO NA CONEXÃO FUKAMI [14]	29
FIGURA 16 - CONJUNTO MÁQUINA CC E GERADOR DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO.....	30
FIGURA 17 - LIGAÇÃO INDEPENDENTE EM MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA [6].....	31
FIGURA 18 – MONTAGEM DO BANCO DE CAPACITORES	32
FIGURA 19 - PONTO DE ESCORVAMENTO DO GERADOR CAPTURADO NO OSCILOSCÓPIO DIGITAL	32
FIGURA 20 - PONTO DE ESCORVAMENTO DO GERADOR SIMULADO PELO <i>MATLAB</i>	33
FIGURA 21 - MONTAGEM UTILIZANDO UMA LÂMPADA E UMA CARGA RESISTIVA VARIÁVEL.....	34
FIGURA 22 – DEFASAMENTO ANGULAR ENTRE TENSÃO E CORRENTE DEVIDO AOS CAPACITORES	35
FIGURA 23 – DEFASAMENTO ANGULAR DE 90° ENTRE TENSÃO E CORRENTE DEVIDO AOS CAPACITORES	36
FIGURA 24 - FORMA DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE CAPTURADAS POR UM OSCILOSCÓPIO	37
FIGURA 25 - FORMA DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE SIMULADOS NO <i>MATLAB</i>	37
FIGURA 26 - FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIA DO CONJUNTO LÂMPADA E CARGA RESISTIVA VARIÁVEL (654W) MEDIDAS POR UM OSCILOSCÓPIO.	38
FIGURA 27 - VALOR DA POTÊNCIA ATIVA (654W) NO REGIME PERMANENTE SIMULADA NO <i>MATLAB</i>	38
FIGURA 28 - FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIA DO CONJUNTO LÂMPADA E CARGA RESISTIVA VARIÁVEL (862 W) MEDIDAS POR UM OSCILOSCÓPIO	39
FIGURA 29 - VALOR DA POTÊNCIA ATIVA (862 W) NO REGIME PERMANENTE SIMULADA NO <i>MATLAB</i>	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DE PLACA MÁQUINA DE INDUÇÃO	30
TABELA 2 - DADOS DE PLACA MÁQUINA CC.....	30
TABELA 3 - DADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. MOTIVAÇÃO	11
1.2. OBJETIVO	12
1.3. ESTRUTURA	12
2. ASPECTOS GERAIS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE ALTERNADA	14
2.1. MÁQUINAS SÍNCRONAS	15
2.2. MÁQUINAS DE INDUÇÃO	19
3. GERADOR DE INDUÇÃO	24
3.1. GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO	24
3.2. GERADOR DE INDUÇÃO NA CONEXÃO FUKAMI	28
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	30
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	34
5.1. GERADOR DE INDUÇÃO A VAZIO	35
5.2. GERADOR DE INDUÇÃO ALIMENTANDO UMA LÂMPADA INCANDESCENTE DE 100W	36
5.3. GERADOR DE INDUÇÃO ALIMENTANDO UMA CARGA COM 654W.....	38
5.4. GERADOR DE INDUÇÃO ALIMENTANDO UMA CARGA COM 862 W.....	39
6. ANÁLISE DE RESULTADOS	40
7. CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

1.1.MOTIVAÇÃO

Grande parte da energia elétrica em todo mundo é gerada por meio de geradores síncronos, que podem ser encontrados em usinas hidroelétricas e termoeletricas, devido à facilidade de se operar em paralelo com o sistema elétrico, às vantagens de compensação de potência reativa, às boas características de tensão e sincronização suave.

O consumo de energia elétrica no Brasil tem aumentado gradualmente, conforme mostram os números do SIN (Sistema Interligado Nacional), onde o ano de 2018 gerou 161.552 MW de potência, sendo que 109.058 MW vieram exclusivamente de usinas hidroelétricas. Para o ano de 2023, é previsto uma geração de 177.971 MW, sendo que a matriz hidrelétrica ainda se mantém predominante, com uma fatia de 64,3 % do total. [18]

Devido à crise energética de 2015, relacionada à seca dos reservatórios de água, causando desabastecimento de energia em várias regiões do Brasil, as tarifas de energia elétrica subiram bastante, pois houve aumento da geração termoeletrica, que têm custos mais elevados [17].

Além do alto consumo energético, os custos para ampliação da malha de transmissão elétrica são altos (141.388 km) e também burocráticos, devido à dificuldade de se obter licenças ambientais. Vislumbrando um cenário alternativo, nos últimos anos a geração distribuída tem se tornado relevante no cenário nacional, abrangendo principalmente as matrizes solar (1,1 %), eólica (8,8%) e de biomassa (8,5%). [18]

Segundo dados da ONS (Operador Nacional do Sistema), atualmente existem 237 sistemas de geração isolada no país [18], principalmente na região norte devido à falta de infraestrutura para que linhas de transmissão consigam chegar até o local, sendo necessária geração síncrona através de grupos geradores à diesel. Além destes casos, geradores portáteis também são utilizados para operações emergenciais em hospitais e grandes centros comerciais, e também são utilizados em horário de ponta em indústrias, a fim de reduzir os custos devido a tarifação ser mais cara neste horário. Mesmo com excelente desempenho, os custos de aquisição e de manutenção de geradores síncronos são altos.

Com isso, os estudos acerca do uso do gerador de indução trifásico em gaiola de esquilo se intensificaram, e comprovaram que o mesmo pode ser utilizado também como um gerador portátil devido à sua robustez, seu baixo custo de aquisição, a manutenção

barata e a não necessidade de se trocar escovas e anéis coletores devido à ausência de um sistema de excitação. Em desvantagem, este tipo de máquina possui uma regulação de tensão pobre e controle de frequência ruim.

Para comprovar os fatos acima, [10] afirma que o uso de geradores de indução em gaiola de esquilo, auto excitado por capacitores externos, para potências de até 10 kVA, custam a metade do preço em relação a um gerador síncrono. E ainda, para potências de até 25 kVA, o gerador de indução torna-se um terço mais barato que o gerador o síncrono. Logo, corrobora-se que o uso do gerador de indução tem muitas vantagens se comparado ao gerador síncrono.

Afim de se utilizar este tipo de máquina como aplicação de geradores portáteis para alimentar cargas residenciais, onde a variação de tensão devido a mudança de carga seja a menor possível, foi proposto que o gerador de indução seja auto excitado, possuindo uma boa regulação de tensão, por meio da conexão de dois capacitores série C_s e um capacitor paralelo C_p aos enrolamentos da máquina, os quais proverão a potência reativa necessária para a manutenção da máquina. Este tipo configuração foi denominado de conexão Fukami.

1.2.OBJETIVO

Este trabalho visa comprovar a teoria que Fukami propôs de se utilizar um gerador de indução em gaiola de esquilo, auto excitado por meio de capacitores bem dimensionados, a fim de corrigir a regulação de tensão e controle de frequência ruim, comuns a estes tipos de máquina, analisando, portanto, o perfil de tensão-frequência quando se alimenta cargas residenciais monofásicas ao alimentar cargas de até 5 kW.

1.3.ESTRUTURA

O trabalho foi estruturado de forma que houvesse um embasamento teórico desde o princípio de funcionamento das máquinas elétricas de corrente alternada, entrando nos níveis de especificidade deste projeto, relacionados ao gerador de indução na conexão Fukami e aos resultados que foram obtidos.

No capítulo 2 trata-se dos aspectos gerais que definem o funcionamento das máquinas elétricas de corrente alternada, citando as diferenças de construção e de

performance existentes entre máquinas síncronas e máquinas de indução, além dos princípios eletromagnéticos que norteiam este tema.

O capítulo 3 foi focado em demonstrar as vantagens de se utilizar geradores de indução em modo isolado, além de nortear o processo de auto excitação utilizando capacitores conectados aos enrolamentos do estator da máquina. E principalmente, explicar como funciona a conexão Fukami, objeto principal de estudo deste trabalho.

O capítulo 4 aborda os procedimentos que foram adotados para a realização do experimento, desde a montagem do sistema: máquina primária de corrente contínua e gerador de indução em gaiola de esquilo, bem como foram feitas as conexões e alimentação dos enrolamentos, além da escolha dos capacitores durante a realização do ensaio a vazio.

Os resultados experimentais são encontrados no capítulo 5, em que foi explicado o porquê da escolha das cargas utilizadas, os demais equipamentos de medição que foram empregados e, por último, todo o processo de análise do perfil tensão-frequência do gerador conforme era feito o aumento de carga através das formas de onda. Além disso, para fins de comparação, foram realizadas algumas simulações no software *Matlab*.

A análise dos resultados foi fruto do Capítulo 6, onde foi possível comparar os resultados práticos com o que é proposto teoricamente por Fukami.

Finalmente, o Capítulo 7 abrange a conclusão deste trabalho, sendo feita uma reflexão acerca dos resultados obtidos e as oportunidades de melhorias para futuros trabalhos.

2. ASPECTOS GERAIS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE ALTERNADA

As máquinas elétricas de corrente alternada (CA) são responsáveis pelo processo de conversão eletromecânica de energia, podendo ser classificadas como gerador ou motor. Se a máquina estiver configurada como motor, ocorre conversão de energia elétrica em mecânica. Já se estiver configurada como gerador, haverá conversão de energia mecânica em energia elétrica [4].

Tais máquinas podem se dividir em dois tipos: as máquinas síncronas, que na maioria dos casos são configuradas como gerador, devido sua vantagem em performance e boa regulação de tensão, e máquinas assíncronas ou de indução, utilizadas massivamente como motor nas indústrias, devido a sua robustez, manutenção barata e construção relativamente simples. [2]

As máquinas de corrente alternada possuem dois enrolamentos: o enrolamento da armadura que fica alojado na parte estacionária da máquina, chamada de estator, e o enrolamento de campo, localizado na parte móvel, conhecida como rotor [1].

Nas máquinas síncronas, o enrolamento de campo é alimentado por corrente contínua (CC) através de contatos rotativos conectados ao estator. Já nas máquinas de indução, o enrolamento de campo é alimentado por corrente alternada (CA) através de indução magnética do campo girante quando a máquina é alimentada por correntes alternadas, que pode ser explicada abaixo através da Lei de Faraday e Lei de Lenz [3].

A Lei de Faraday é explicada quando se coloca uma bobina na presença de um campo magnético variável no tempo, surgindo assim, uma tensão induzida nas extremidades da mesma, sendo diretamente proporcional ao fluxo magnético [3]. Isto é demonstrado pela equação 2.1.

$$e_{ind} = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1)$$

Se a bobina for composta por N espiras e o mesmo fluxo passar por elas, logo a tensão induzida total será de acordo com a equação 2.2.

$$e_{ind} = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.2)$$

Onde:

e_{ind} = tensão induzida nas extremidades da bobina;

N = número total de espiras da bobina;

φ = é o fluxo que passa pela bobina.

O sinal negativo da equação é explicado pela Lei de Lenz, que afirma que a tensão induzida na bobina gera um fluxo oposto a variação do fluxo que o produziu [3].

Em resumo, devido ao movimento relativo entre um campo magnético e uma bobina, tensões podem ser geradas e conjugados surgem pela interação entre o eixo magnético do estator e do rotor [1].

2.1.MÁQUINAS SÍNCRONAS

Dentre os diversos tipos de máquinas elétricas existentes, a máquina síncrona é aquela que mais se destaca; os geradores síncronos são responsáveis por gerar a maior quantidade de energia elétrica no mundo, sendo encontrado em usinas hidroelétricas, turbo geradores e etc. [5]. Além disso, possui capacidade de compensação de potência reativa, e seu processo de sincronização é suave. Por outro lado, é um tipo de máquina com custo de aquisição e manutenção alto

Em condições de regime permanente, uma máquina síncrona tem característica de velocidade proporcional à magnitude da frequência das correntes alternadas que são aplicadas no enrolamento de armadura, também chamado de enrolamento induzido. Já o enrolamento de campo é alimentado quando corrente contínua é aplicada através de escovas estacionárias de carvão, fazendo com que anéis coletores façam contato com o enrolamento do rotor, gerando assim o fluxo magnético que induzirá tensão na armadura [1].

Afim de que as tensões induzidas na máquina tenham frequência constante, é preciso que a velocidade mecânica do rotor seja igual a velocidade síncrona (campo girante). Por haver esta proporcionalidade entre a velocidade da máquina e a frequência da tensão induzida, a máquina é chamada de síncrona, e é explicada pela equação 2.2.

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

Onde,

n_s = velocidade síncrona da máquina (rpm);

f = frequência (Hz);

p = número de pólos.

Portanto, quanto maior for o número de pólos da máquina, menor será a velocidade da mesma. Por outro lado, quanto maior for a frequência da tensão de entrada, maior será a velocidade síncrona. Em resumo, para produzir energia elétrica em 60 Hz em uma máquina de 4 pólos, a velocidade síncrona deverá ser de 1800 rpm.

O rotor da máquina síncrona pode se apresentar de duas formas [5], conforme as figuras 1 e 2:

- Máquina síncrona de rotor de pólos lisos:** o enrolamento do estator é distribuído (minimização dos efeitos das harmônicas espaciais); são máquinas utilizadas para aplicações com altas velocidades.
- Máquina síncrona de rotor de pólos salientes:** o enrolamento do estator é concentrado; são máquinas com disponibilidade para qualquer potência e velocidade síncrona.

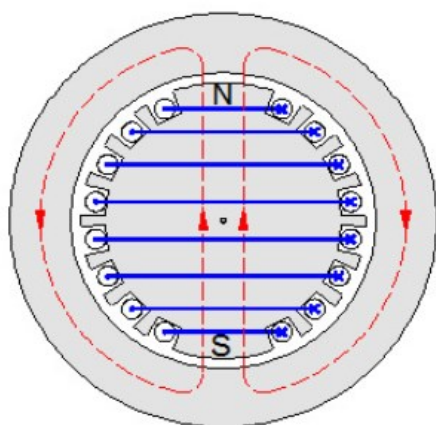


Figura 1 – Rotor de Polos Lisos [5]

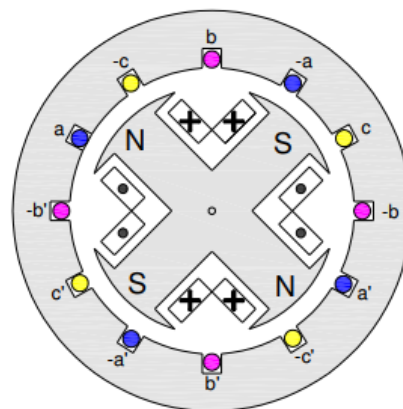


Figura 2 - Rotor de Pólos Salientes [5]

Além do enrolamento de campo e de armadura, a maioria das máquinas síncronas possuem um terceiro enrolamento denominado de enrolamento amortecedor, cuja função

é manter o sincronismo quando conectado como gerador, e de auxiliar na partida quando conectado como motor [5].

A figura 3 ilustra o esquema geral de uma máquina síncrona:

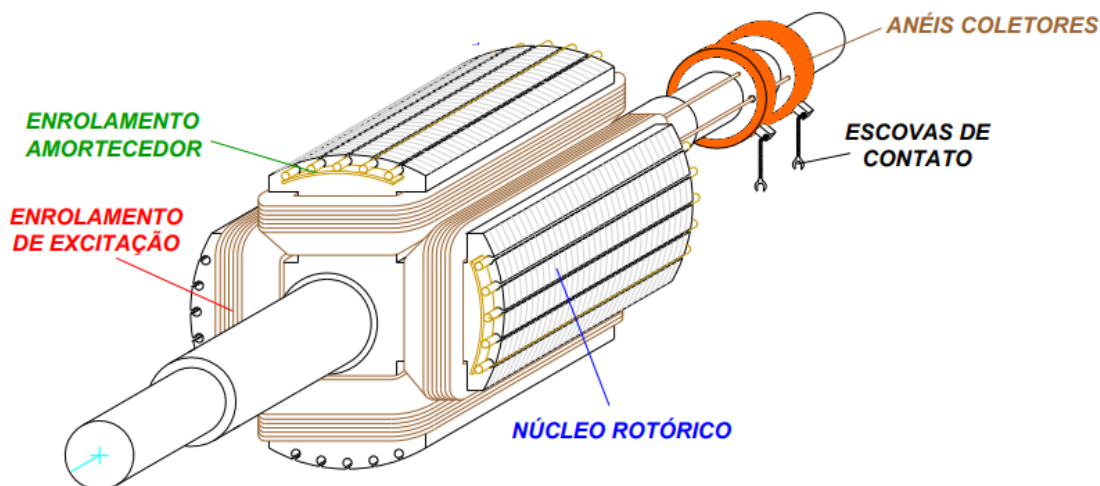


Figura 3 - Máquina Síncrona com Rotor de Pólos Lisos [8]

Tomando um gerador síncrono trifásico como exemplo, para obter tensões defasadas de 120° no tempo, é necessário que haja 3 bobinas defasadas de 120° no espaço da máquina [1], conforme a figura 4:

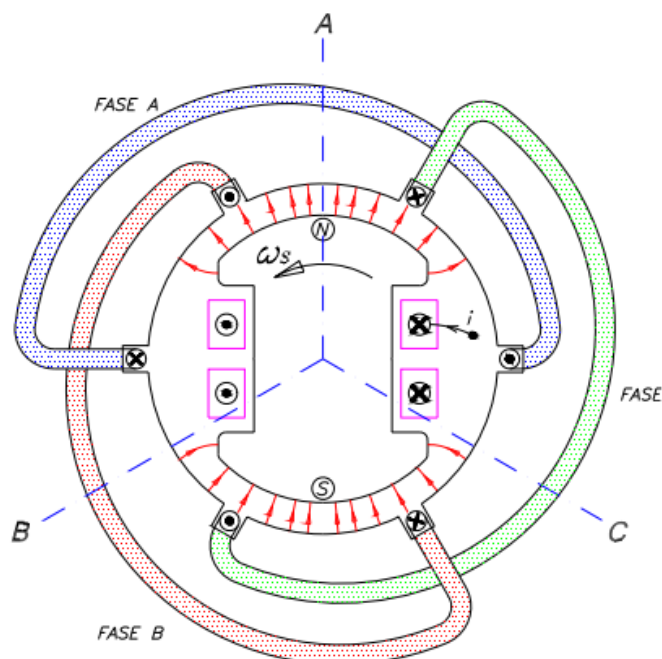


Figura 4 - Bobinas de um gerador síncrono, posicionadas a 120° entre si [8]

Em condições de sistema equilibrado e sequência de fase *abc*, as magnitudes das tensões podem ser calculadas de acordo com as equações 2.3, 2.4, 2.5:

$$E_a = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.3)$$

$$E_b = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (2.4)$$

$$E_c = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t + 120^\circ) \quad (2.5)$$

Onde,

E_a = magnitude de tensão na fase A;

E_b = magnitude de tensão na fase B;

E_c = magnitude de tensão na fase C;

E_m = magnitude de tensão máxima.

Um gerador síncrono ao alimentar uma carga, faz com que a corrente de armadura gere um fluxo no entreferro na velocidade síncrona. A corrente de campo também gera um fluxo, e a partir de então, haverá uma interação entre estes fluxos com a tendência de que seus eixos se alinhem através de um conjugado eletromagnético T oposto ao sentido de rotação, fazendo com que também surja um conjugado de carga C oposto a este para que mantenha a rotação do mesmo. A posição relativa entre os eixos de força magnetomotriz (fmm) ‘E’ e ‘R’ é o que distingue o funcionamento como motor ou gerador. Esse processo resume a conversão de energia mecânica em elétrica [10], e é ilustrado na figura 5:

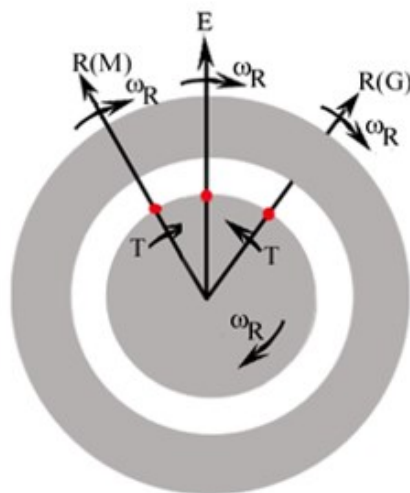


Figura 5 – Eixo dos Campos Magnéticos do Rotor e Estator na Máquina Síncrona

2.2.MÁQUINAS DE INDUÇÃO

Diferentemente das máquinas síncronas, as máquinas de indução, também conhecidas como assíncronas, são amplamente utilizadas no ramo industrial devido sua robustez, baixos índices de manutenção, construção simples, custo de aquisição menor, e por não possuírem sistema de excitação, não necessitam de escovas de carvão e não contribuem para o nível de curto de circuito, logo não precisam de um sistema de proteção. Por outro lado, são máquinas com regulação de tensão ruim e frequência variável com a carga.

Além disso, nas máquinas de indução a corrente alternada é aplicada diretamente nos enrolamentos de armadura alojados nas ranhuras do estator (aço laminado), fazendo com que as correntes no rotor sejam produzidas por indução magnética, simulando o que ocorre em um transformador, ou seja, a potência elétrica é transformada entre o estator e o rotor em potência mecânica [1]. Portanto, esta máquina se torna mais simples ainda por não necessitar de corrente contínua para partida, e nem de escovas estacionárias de carvão.

Os enrolamentos do rotor são barras de cobre eletricamente curto-circuitadas por anéis e sem conexões externas, como ocorre nos rotores em gaiola de esquilo, já que a corrente é induzida magneticamente. Também podem ser curtos-circuitados externamente, no caso do rotor bobinado, quando se deseja alterar a resistência do enrolamento para melhorar a partida, controlar a corrente no rotor e a velocidade da máquina [9]. Os rotores são ilustrados nas figuras 6 e 7:

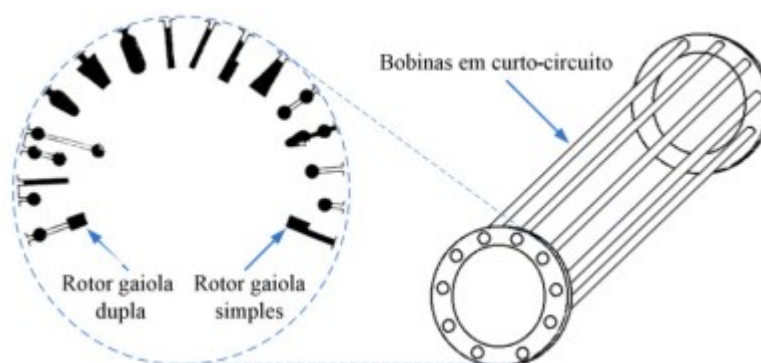


Figura 6 - Rotor em Gaiola de esquilo [9]

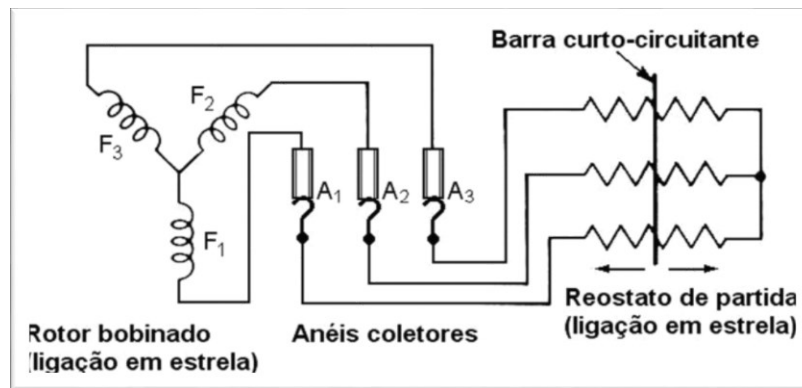


Figura 7 - Rotor Bobinado [9]

Nas máquinas de indução, o fluxo magnético atravessa as barras curto-circuitadas do rotor, induzindo corrente e tensão que serão responsáveis por gerar torque no rotor. Para que isto sempre ocorra, é necessário que o rotor gire sempre acima ou abaixo da velocidade síncrona [10]. Isso é verificado nas sentenças abaixo:

- a) Caso velocidade do rotor seja menor e no mesmo sentido que a velocidade síncrona, a máquina está configurada como **motor**, ou seja, fornecendo potência mecânica no seu eixo (conjugado positivo).
- b) Caso velocidade do rotor seja maior que a velocidade síncrona, a máquina está configurada como **gerador**, fornecendo potência elétrica no seu eixo (conjugado negativo).
- c) Quando o campo girante da armadura se encontra oposto ao campo girante do rotor, a máquina está em **estado de freio** [11].

A figura 8 resume o que é descrito acima:

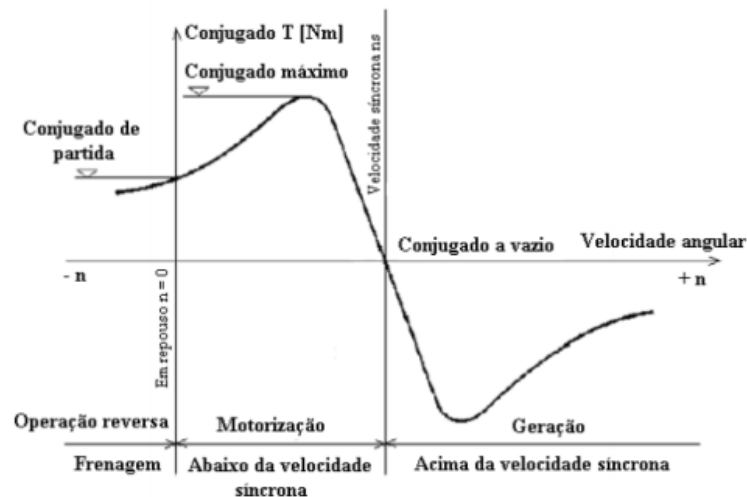


Figura 8 - Modos de operação da máquina de indução [4]

A diferença entre a velocidade síncrona n_s e a velocidade do rotor n é definida pelo *escorregamento* e é representada pela equação 2.6.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.6)$$

Onde,

s = escorregamento;

n_s = velocidade síncrona;

n = velocidade do rotor.

Se a equação 2.6 for reescrita, pode-se obter a velocidade do rotor pela equação 2.7.

$$n = (1 - s)n_s \quad (2.7)$$

Assim como na seção anterior, toma-se uma máquina de indução trifásica com os enrolamentos defasados de 120° no estator. Se os mesmos forem alimentados com tensões trifásicas na sequência abc, correntes trifásicas serão induzidas e formarão um campo magnético girante. A figura 9 ilustra a distribuição espacial das bobinas no estator e rotor:

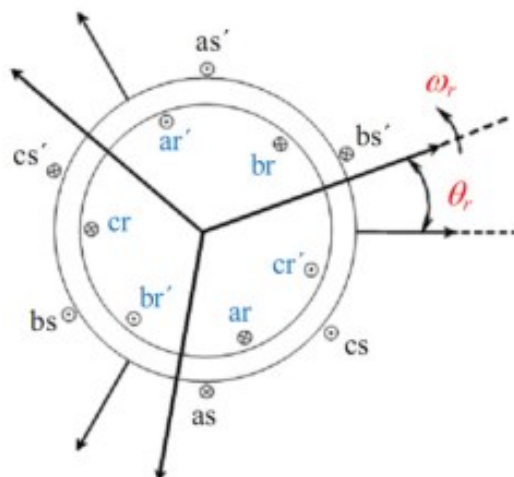


Figura 9 - Distribuição espacial das bobinas no estator e no rotor [11]

Em [1], ao utilizar um motor de indução, quando o rotor encontra-se parado, a frequência da tensão induzida é igual a frequência do campo magnético girante, ou seja o escorregamento é unitário. Logo, o eixo magnético do rotor girará na mesma velocidade ω que o eixo magnético do estator, surgindo um conjugado eletromagnético T com tendência de alinhar “R” no sentido de “E”, fazendo o rotor sair da inércia, conforme ilustrado na figura 10. Se este conjugado superar a oposição criada pelo conjugado de carga C , o motor atingirá o ponto de operação nominal. Lembrando que a velocidade do rotor n não pode se igualar a velocidade síncrona n_s , senão não haverá conjugado.

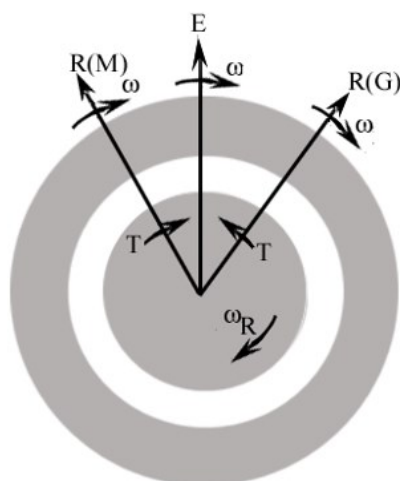


Figura 10 - Eixo dos Campos Magnéticos do Rotor e Estator na Máquina de Indução

Em [10], quando a máquina está configurada como gerador de indução, é caracterizada por ter potência reativa insatisfatória. Quando o gerador opera conectado a

um barramento, o reativo pode ser drenado da rede elétrica, entretanto se o mesmo estiver operando em modo isolado, será necessário conectar um banco de capacitores aos enrolamentos do estator. Este será o objeto de estudo central deste trabalho nas próximas seções.

3. GERADOR DE INDUÇÃO

3.1. GERADOR DE INDUÇÃO AUTOEXCITADO

O gerador de indução em gaiola de esquilo é a melhor opção para utilização como gerador portátil, devido a capacidade de autoproteção e um bom desempenho dinâmico. O principal problema deste gerador é a incapacidade de fornecer reativo para uma carga indutiva, ou até mesmo para ele mesmo. Quando opera interligado, o reativo da rede alimenta a máquina. Ao trabalhar isolado e sendo acionado por uma máquina primária na velocidade síncrona, é necessário que um banco de capacitores seja conectado aos enrolamentos do estator para que a o ponto de operação seja alcançado [13].

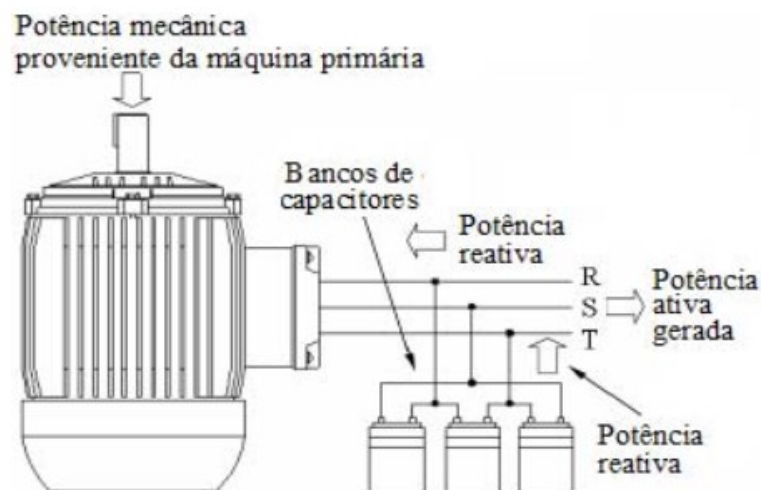


Figura 11 - Esquema de ligação do banco de capacitores à Máquina de Indução [2]

O gerador de indução possui um pequeno magnetismo residual no núcleo, devido às operações anteriores, que induz uma pequena tensão no estator, com amplitude e frequência diretamente proporcionais, respectivamente, ao nível de magnetização e velocidade de acionamento do rotor [2]. A reatância de um capacitor tem características de linearidade entre tensão e corrente quando o este é conectado ao gerador. Portanto, quando a linha de capacitância se cruza com a curva de magnetização do gerador, encontra-se o ponto de operação nominal, conforme exemplificado na figura abaixo:

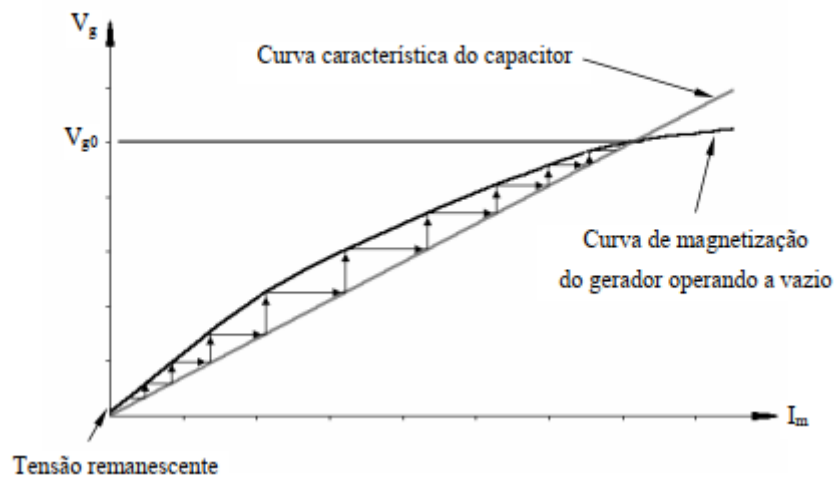


Figura 12 - Curva de Magnetização e linha de carga de capacitores no gerador de indução [12]

O processo de auto excitação mostrado anteriormente é explicado da seguinte forma: quando um capacitor adequado é conectado nos enrolamentos do estator, uma tensão V_o que existe devido ao magnetismo residual é aplicada aos terminais do capacitor e faz o rotor girar. Por sua vez, surge uma corrente adiantada em 90° em relação a tensão, que irá circular pelas bobinas, aumentando a intensidade do campo magnético, fazendo com que surja uma nova tensão residual V' maior que antes. Esta mesma tensão é aplicada novamente nos capacitores, fazendo circular uma nova corrente. Este processo se torna cíclico até que a linha de capacitância intercepte a curva de magnetização [13].

É importante salientar que no ponto de operação nominal, a tensão obtida é quando o gerador está operando a vazio, ou seja, ao conectar cargas ao gerador, haverá uma queda de tensão interna no mesmo, devido ao aumento de corrente ocasionado pela necessidade de se gerar mais reativo para que a tensão se mantenha estável. De forma análoga, quando uma carga é retirada do sistema, haverá um excesso de reativo, fazendo com que a tensão aumente muito, sendo necessário fazer o ajuste do banco de capacitores [12].

A variação de carga, além de alterar os níveis de tensão, faz com que a frequência também varie. Isso é verificado a partir do ponto de operação da máquina. Não é conveniente operar um gerador em baixa rotação, pois o reativo será muito pequeno e, portanto, será necessária uma capacitância maior, fazendo com que circule correntes maiores pelos enrolamentos, aumentando as perdas por Efeito Joule [12].

Analisando as equações 3.1 e 3.2, também pode-se concluir que quanto maior for a potência reativa, menor será a potência ativa útil fornecida à carga e menor será a potência aparente, já que a corrente é dada em função da capacidade nominal da máquina.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.1)$$

$$S = V * I \quad (3.2)$$

Onde:

S = potência aparente [VA];

P^2 = potência ativa [W];

Q = potência reativa [Var];

V = tensão eficaz;

I = corrente eficaz.

O ponto de operação nominal de um gerador de indução varia de acordo com o tipo de carga que é conectado a ela, ou seja, cada carga apresentará uma reta de reatância capacitiva interceptando pontos diferentes da curva de saturação. Por este motivo é dito que o gerador de indução possui uma pobre regulação de tensão quando alimenta cargas indutivas sob velocidade variável, pois a reatância de carga se opõe a reatância do banco de capacitores, fazendo com que a máquina opere com um escorregamento menor, e por consequência maior rotação e frequência [11]. Isso é demonstrado nas hipóteses a seguir:

A equação 3.3 mostra que a frequência é inversamente proporcional a reatância capacitiva:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.3)$$

Onde:

X_c = reatância capacitiva [Ω];

f = frequência [Hz];

C = capacitância [F]

Se a frequência aumenta, por sua vez, a velocidade síncrona também aumenta e isto é verificado pela equação 3.4.

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (3.4)$$

Onde:

n_s = velocidade síncrona da máquina (rpm);

f = frequência (Hz);

p = número de pólos.

Então, se a velocidade síncrona aumenta, o escorregamento diminui, e, portanto, a velocidade do rotor aumenta, como demonstrado na equação 3.5.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.5)$$

Onde,

s = escorregamento;

n_s = velocidade síncrona;

n = velocidade do rotor.

A má regulação de tensão no gerador de indução pode ser provada na figura abaixo: o aumento gradual de cargas provoca a queda de tensão interna na máquina:

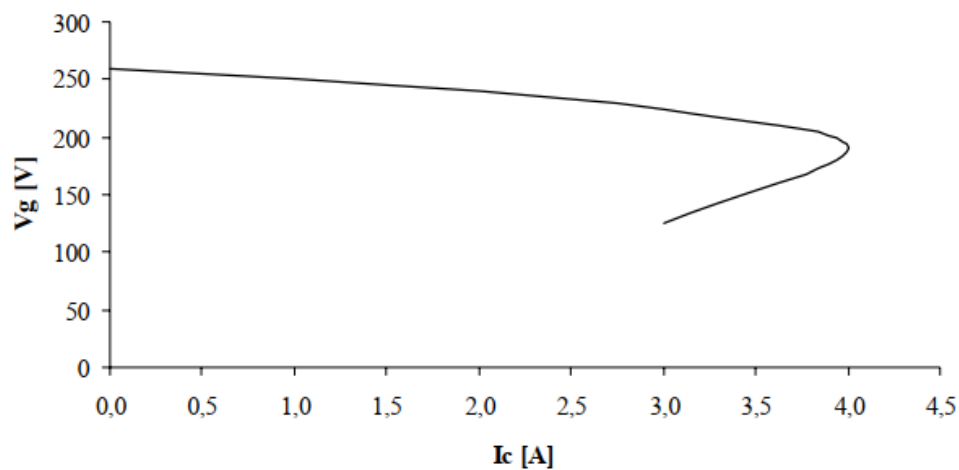


Figura 13 - Regulação de tensão no gerador de indução [12]

Existem técnicas para que a regulação de tensão seja controlada de acordo com a variação da carga e se resumem em [4]:

- Método do capacitor série;
- Método dos capacitores chaveados;
- Método do controlador de fluxo de potência ativa;

- Método do controlador de fluxo de potência reativa;
- Método por inversor de frequência.

3.2.GERADOR DE INDUÇÃO NA CONEXÃO FUKAMI

Como foi explicado nos tópicos anteriores, o gerador de indução possui diversas vantagens se comparado a um gerador síncrono, dentre elas, o baixo custo de manutenção e robustez da máquina, entretanto possui uma pobre regulação de tensão e auto excitação insuficiente, que a princípio inviabilizaria a utilização deste como um gerador de energia portátil para alimentar cargas residenciais monofásicas.

Afim de suprir esta desvantagem, foi proposto por [14] um novo tipo de gerador de indução trifásico auto excitado, em gaiola de esquilo e conexão Y, além de três capacitores conectados aos enrolamentos do estator, chamado conexão Fukami, podendo alimentar cargas de até 5 kW. Estes capacitores são configurados da seguinte forma: dois dos capacitores C_s são conectados em série com os enrolamentos, e o terceiro C_p em paralelo com a carga, sendo separado por uma chave trifásica. A figura 14 ilustra o esquema de montagem da máquina:

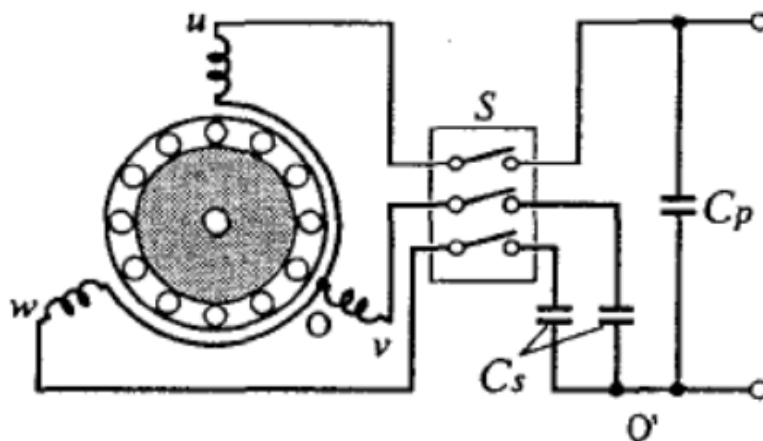


Figura 14 - Esquema da conexão Fukami em um gerador de indução [14]

Como dito nos tópicos anteriores, o objetivo dos capacitores é de fornecer a potência reativa necessária para que a máquina alcance o ponto de operação nominal. Além disso, a conexão Fukami permite uma redução do fenômeno de pulsação de potência comum em outros tipos de máquinas de indução, que causam vibração e barulho quando estão operando a plena carga [14].

Vale frisar que o gerador de indução em conexão Fukami possui uma excelente vantagem de auto regulação, que consiste em regular a corrente de entrada de acordo com a variação de carga, de forma automática. Além disso, a configuração dos enrolamentos do estator em estrela (Y), faz com que a forma de onda de tensão de saída seja puramente senoidal, devido a supressão da tensão harmônica, além de não circular correntes de fase em sequência zero [15].

O princípio de operação do gerador de indução na conexão Fukami é o mesmo que foi explicado no tópico anterior. Em resumo, quando o rotor é acionado por uma máquina primária, a tensão remanescente no gerador devido ao magnetismo residual é aumentada até que alcance o ponto de operação nominal, devido ao processo de auto excitação e aos capacitores conectados. Quando os três capacitores serie-paralelo são bem calculados, a variação de tensão na saída será mínima e não-dependente da carga que estiver alimentando [14].

Entretanto quando o magnetismo residual do gerador não é suficiente para iniciar o processo de auto excitação, é necessário a utilização de um circuito eletrônico de pré-excitação conectado em paralelo a carga, que consiste em uma bateria que injeta corrente contínua no estator do gerador, fazendo com o que o processo de auto excitação se inicie [16]. Este esquema é visto na figura 15:

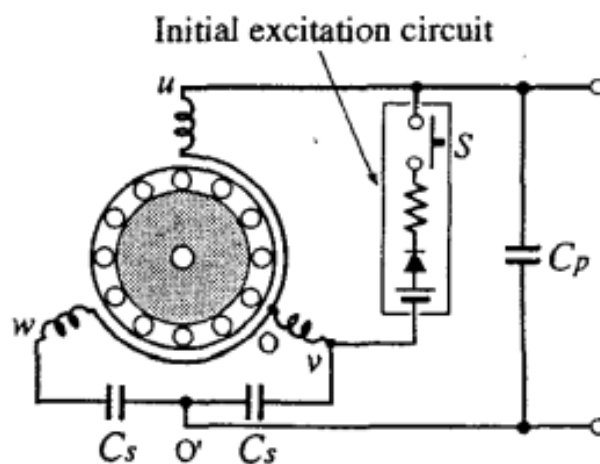


Figura 15 - Circuito de pré-excitação em um gerador de indução na conexão Fukami [14]

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste experimento, o gerador de indução foi acionado através de uma máquina primária CC devido à excelente característica de controle de velocidade. As especificações técnicas de ambas máquinas foram coletadas das placas e são exibidas nas tabelas 1 e 2:

Tabela 1 - Dados de Placa Máquina de Indução

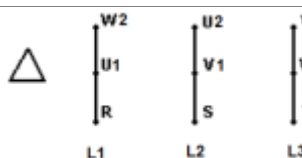
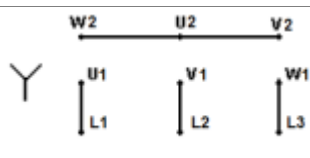
Dados de Placa - Máquina de Indução WEG W22					
1 HP	60 Hz	220/380 V	1730 rpm	$\cos \phi = 0,81$	$\eta = 80,5\%$
IP/In= 6,6	Cat. N	Isol. F	Reg. S1	IP55	F.S. = 1,15
					
220 V			380 V		

Tabela 2 - Dados de Placa Máquina CC

Dados de Placa - Máquina de Corrente Contínua ENIKA					
1 HP	60 Hz	220 V	Exc. 200 DC	1800 rpm	In = 4,2 A

O esquema mostrado na figura 16 mostra a ligação do conjunto motor CC + gerador de indução:

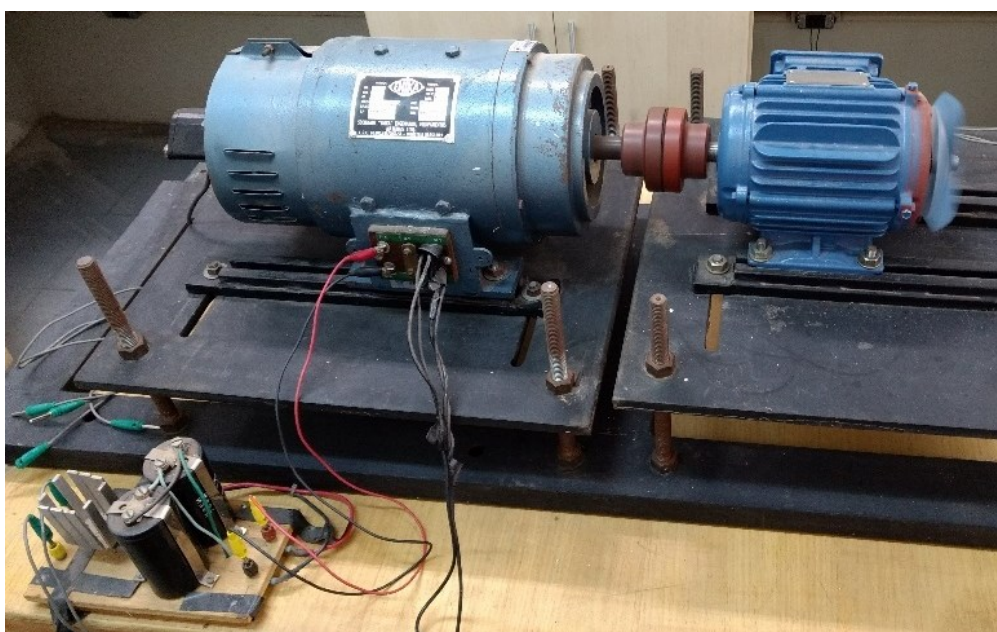


Figura 16 - Conjunto máquina CC e gerador de indução gaiola de esquilo

Como dito por [1], as máquinas CC são caracterizadas pela sua versatilidade, e isto é possível graças às diferentes ligações que podem ser realizadas nos enrolamentos de campo e de armadura, conferindo uma velocidade de saída controlada.

Neste experimento, a ligação do campo foi realizada de forma independente, ou seja, foram utilizadas fontes individuais (varivolt) para alimentar o enrolamento do campo e o enrolamento da armadura. A velocidade da máquina foi controlada através do ajuste de tensão da armadura (fluxo magnético constante), mantendo a corrente de excitação I_{ex} constante no enrolamento do campo. Como o enrolamento de campo e armadura devem ser alimentados com corrente contínua, o varivolt precisa ser conectado em um retificador. A configuração do motor cc é mostrada na figura 17:

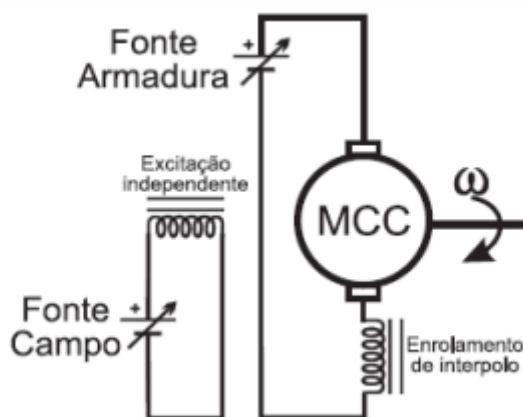


Figura 17 - Ligação independente em motores de corrente contínua [6]

Conforme dito na seção 3.2, a conexão Fukami se caracteriza pela necessidade de alimentar os enrolamentos do estator com capacitores, afim de suprir a demanda por reativo do gerador. Para isso é necessário conectar três capacitores: um capacitor paralelo C_p e dois capacitores série C_s .

Durante a montagem prática foram testados vários capacitores a fim de que pudesse ser escolhido aquele que pudesse proporcionar a melhor excitação e a menor variação de tensão nominal mediante a variação de carga. Os primeiros testes não geraram bons resultados, pois a máquina não escorvou, ou seja, o reativo disponibilizado pelos capacitores não foi suficiente para a auto excitação, além do fato destes não serem chaveados.

Finalmente, após alguns ensaios com os capacitores disponíveis, foi definido que cada capacitor série C_s seria montado com 2 capacitores paralelos de $10\mu F$ 600 Vdc, e o capacitor paralelo C_p seria montado com 2 capacitores paralelos de $10\mu F$ 1000 Vdc. A

figura 18 ilustra a montagem do banco de capacitores, utilizando uma chave trifásica para conectar/desconectar a carga quando necessário:

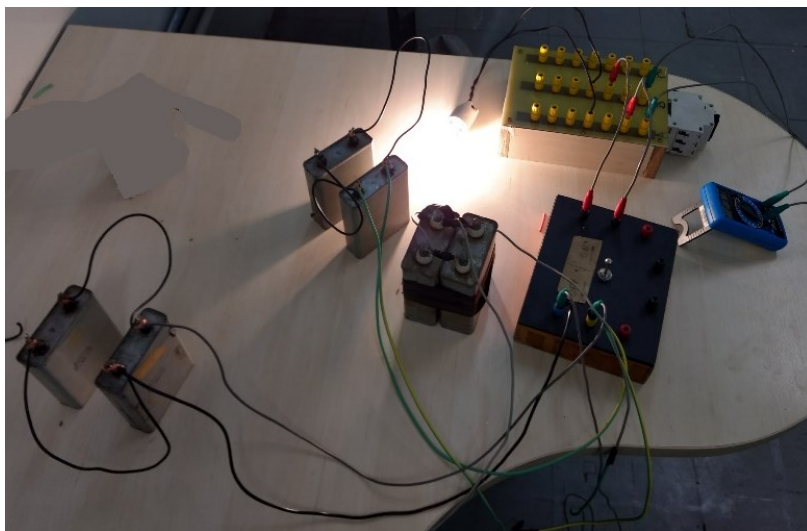


Figura 18 – Montagem do Banco de Capacitores

O ponto de escorvamento é um fenômeno transitório e é observado quando se acelera máquina primária rapidamente, alcançando uma elevada tensão. Este momento foi capturado por um osciloscópio digital *Tektronix TPS 2024B*. Para efeitos de comparação, foi feita uma a simulação do sistema no software *Matlab*, e foi possível capturar este mesmo ponto. As figuras 19 e 20 comprovam esta afirmação:

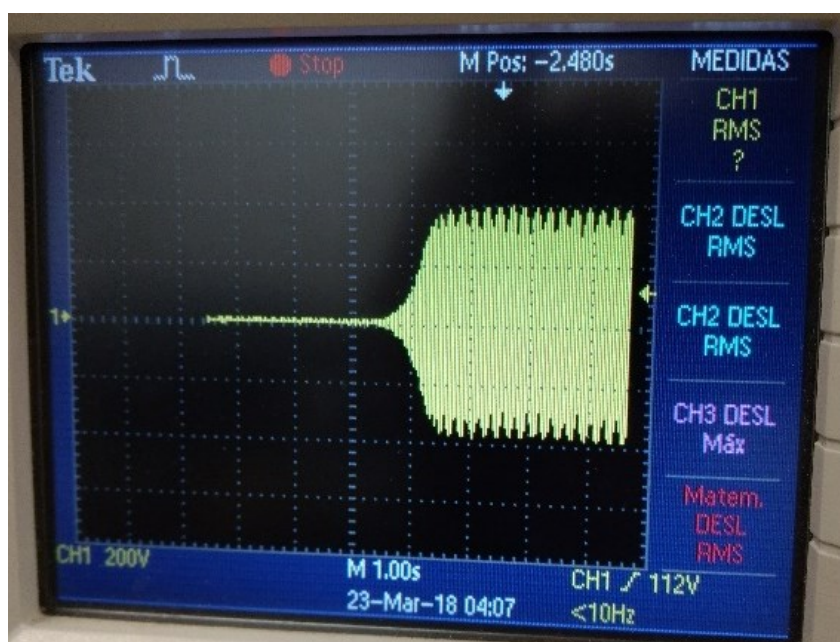


Figura 19 - Ponto de Escorvamento do gerador capturado no osciloscópio digital

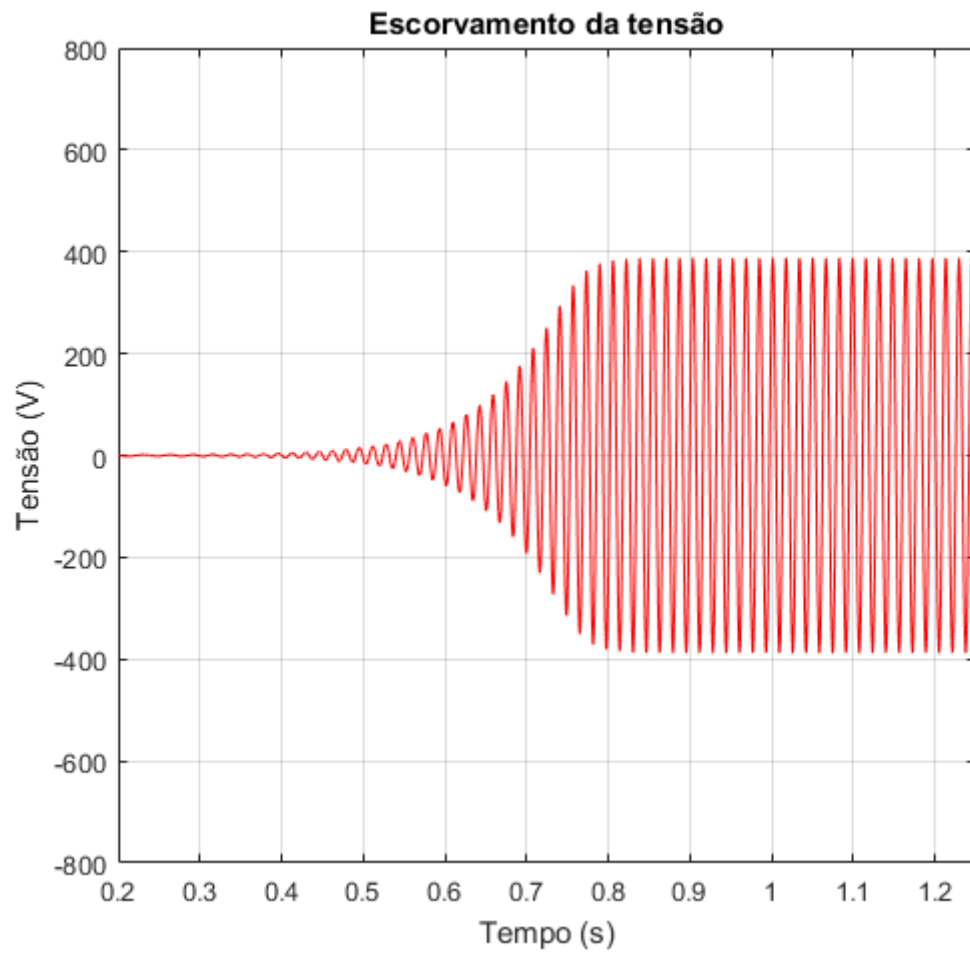


Figura 20 - Ponto de Escorvamento do gerador simulado pelo *Matlab*

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para o experimento descrito a seguir, devido as limitações de potência da máquina, apenas cargas resistivas foram utilizadas, a saber:

- Lâmpada incandescente de 100 W;
- Carga resistiva variável (reostato).

Além das cargas, também foram utilizados os bancos de capacitores que foram definidos na seção anterior, um osciloscópio digital *Tektronix TPS 2024B* com uma ponteira de potência, para captura das formas de ondas de tensão e um alicate amperímetro *Tektronix A622* para medição da corrente, um multímetro *Minipa ET-1002* para medir a tensão nos terminais da carga, além de duas chaves trifásicas, sendo uma para conectar/desconectar as cargas, e outra para conectar/desconectar os capacitores. A montagem é ilustrada conforme figura 21:

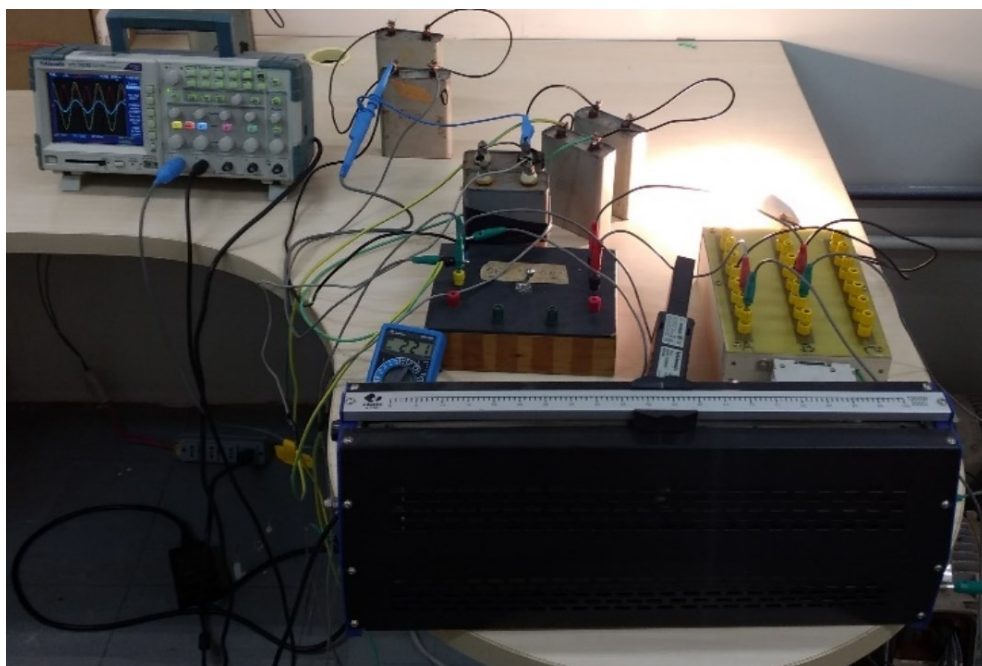


Figura 21 - Montagem utilizando uma lâmpada e uma carga resistiva variável

Portanto, a montagem foi dividida em quatro etapas, com o aumento gradual de carga, para que pudesse ser averiguado a forma de onda da tensão, da corrente e da potência de cada caso. Além disso, foi feito as simulações de formas de ondas para alguns experimentos no software *Matlab*, para contribuir na análise de resultados, como parâmetro de comparação.

5.1. GERADOR DE INDUÇÃO A VAZIO

Primeiramente, foi necessário partir o gerador a vazio, mantendo-se a velocidade do gerador em 1800 rpm, sendo verificada por um tacômetro, e com tensão medida nos terminais de conexão da carga, utilizando um multímetro.

Este ensaio teve o objetivo de colocar a máquina em operação nominal, através do ajuste adequado do banco de capacitores conectados aos enrolamentos do estator. As figuras 22 e 23 mostra a defasagem entre as formas de onda de corrente e a tensão:

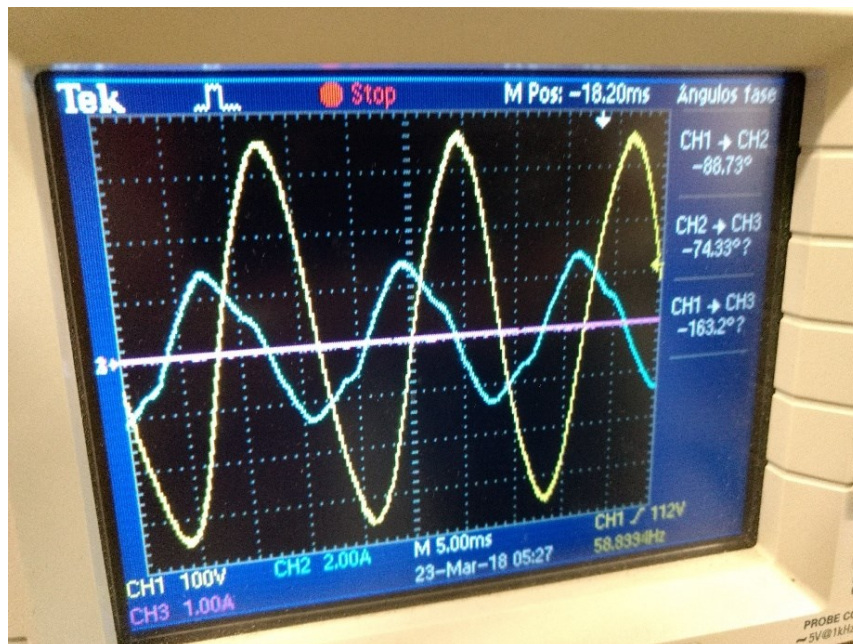


Figura 22 – Defasamento angular entre tensão e corrente devido aos capacitores

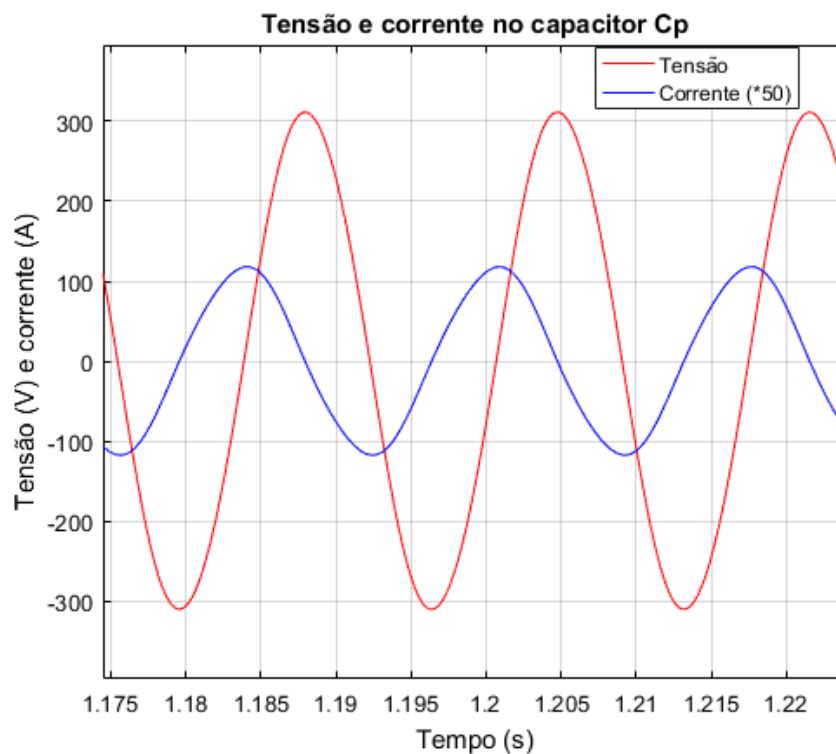


Figura 23 – Defasamento angular de 90° entre tensão e corrente devido aos capacitores

5.2.GERADOR DE INDUÇÃO ALIMENTANDO UMA LÂMPADA INCANDESCENTE DE 100W

Ao inserir uma lâmpada incandescente, foi obtido as formas de onda da tensão e da corrente que são demonstradas nas figuras 24 e 25, sendo que o valor da tensão foi medido diretamente nos terminais da carga utilizando-se um multímetro.

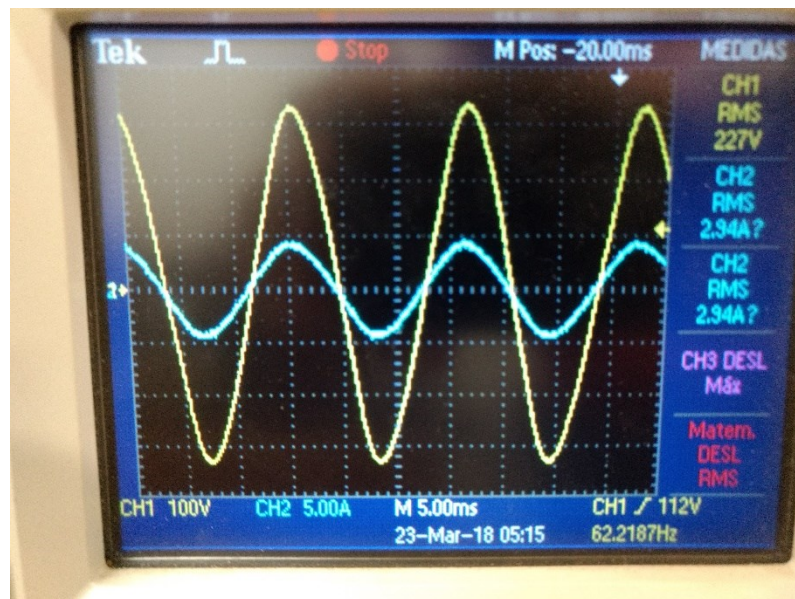


Figura 24 - Forma de onda de tensão e corrente capturadas por um osciloscópio



Figura 25 - Forma de onda de tensão e corrente simulados no *Matlab*

As formas de onda de tensão e corrente das figuras 24 e 25 também abrangem os demais experimentos e não serão exibidas novamente, pois se referem a cargas resistivas, ou seja, não há defasagem entre tensão e corrente.

5.3.GERADOR DE INDUÇÃO ALIMENTANDO UMA CARGA COM 654W

Em complemento ao item 5.2, foi adicionado uma carga variável fixada em 554 W, que somada ao valor da lâmpada, totaliza 654 W. As formas de onda da corrente, da tensão e da potência média são mostradas nas figuras 26 e 27:

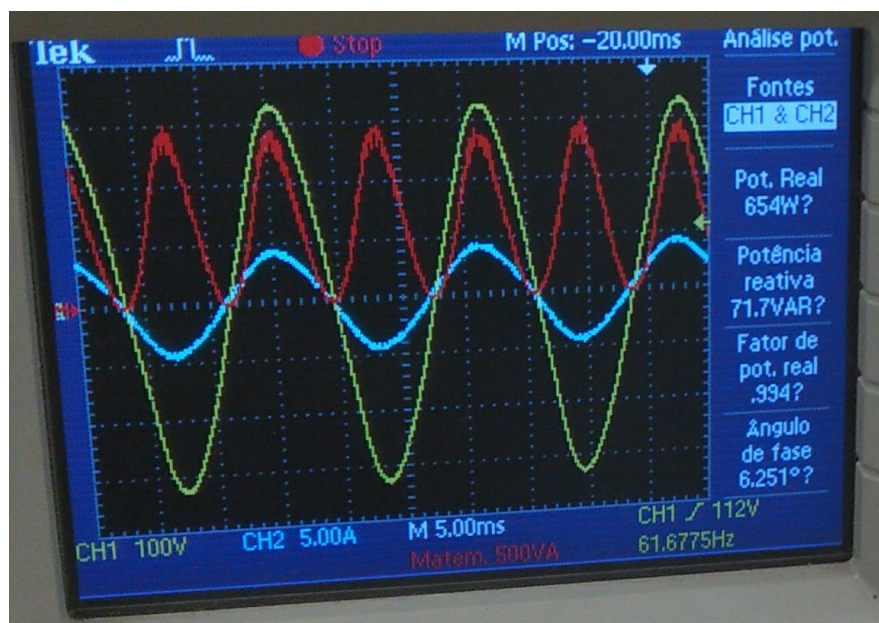


Figura 26 - Formas de onda de corrente, tensão e potência do conjunto lâmpada e carga resistiva variável (654W) medidas por um osciloscópio.

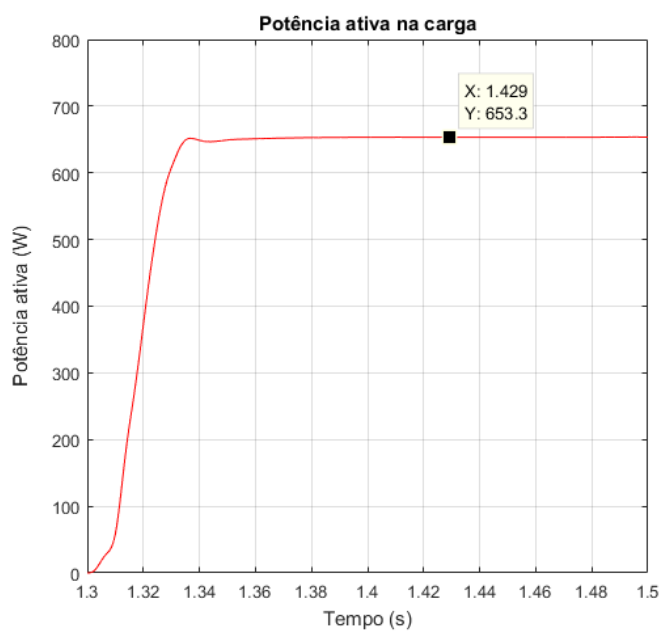


Figura 27 - Valor da Potência Ativa (654W) no Regime Permanente simulada no Matlab

5.4.GERADOR DE INDUÇÃO ALIMENTANDO UMA CARGA COM 862 W

A montagem executada foi a mesma do tópico anterior, porém o reostato foi ajustado para 762 W, totalizando junto à lâmpada, 862 W. As formas de onda da tensão, corrente e potência média são mostradas na figuras 28 e 29:

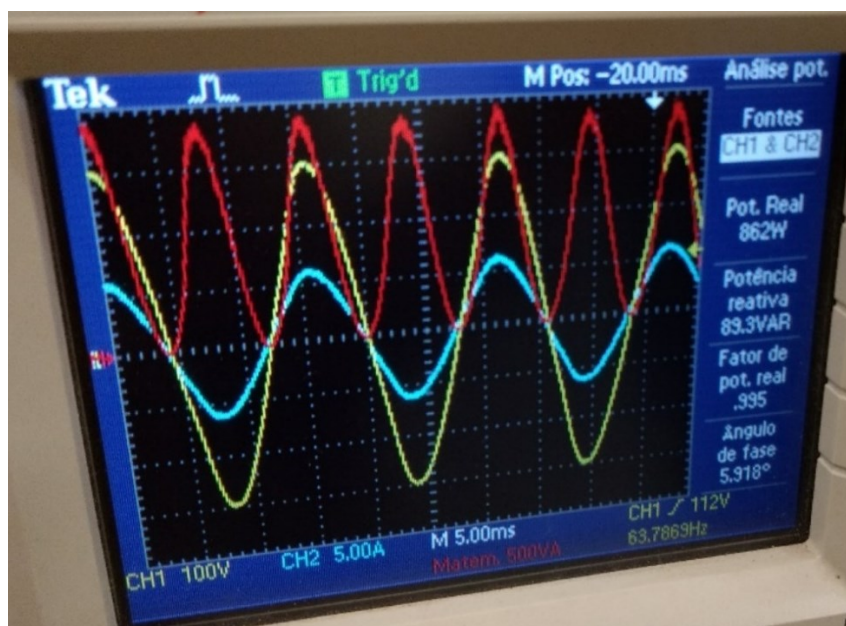


Figura 28 - Formas de onda de corrente, tensão e potência do conjunto lâmpada e carga resistiva variável (862 W) medidas por um osciloscópio

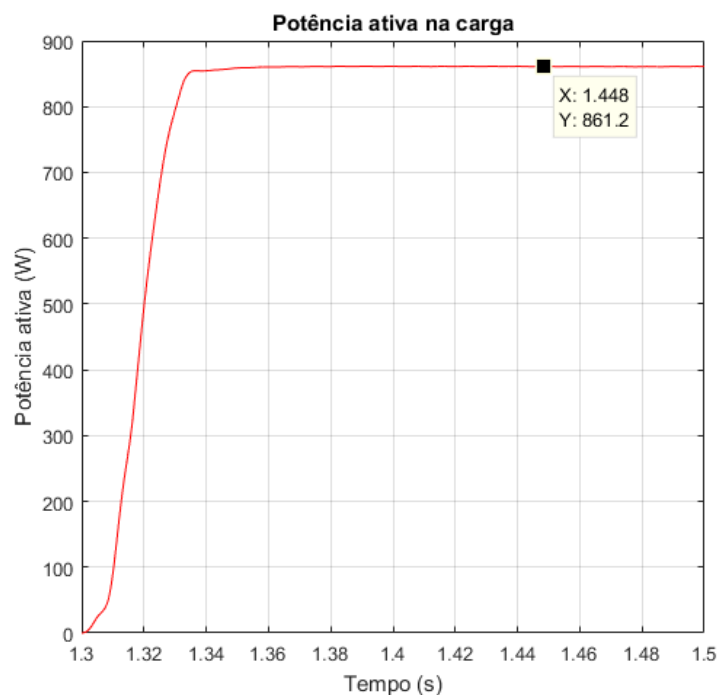


Figura 29 - Valor da Potência Ativa (862 W) no Regime Permanente simulada no *Matlab*

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Afim de facilitar a discussão dos resultados obtidos, a tabela 3 abaixo irá mostrar os dados de cada experimento:

Tabela 3 - Dados obtidos experimentalmente

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Real (W)	Frequência (Hz)
A vazio	243	1,81	-	58,9
Lâmpada	239	2,1	100	58,2
Lâmpada + Carga Resistiva (50%)	220	2,94	654	61,7
Lâmpada + Carga Resistiva (>50%)	211	4,26	862	63,7

Durante todo o experimento foi usado o mesmo banco de capacitores, e isso explica o fato da tensão e da frequência terem tido variação em relação a seus valores nominais, de 220 V e 60 Hz respectivamente. Como foi dito na seção 3.1, para que ocorra a magnetização da máquina, é preciso partir a máquina a vazio, obtendo-se assim uma elevada tensão inicial. O ponto de operação nominal do gerador somente é alcançado quando a reta de capacitância dos capacitores intercepta a curva de magnetização da máquina.

Vale ressaltar que toda adição de carga provocava uma queda na velocidade da máquina primária, sendo necessário realizar medições utilizando um tacômetro digital, além de averiguar os níveis de tensão na saída do gerador, para a escolha correta dos capacitores.

Ao inserir a lâmpada, houve uma queda de tensão no gerador e o consequente aumento da corrente para suprir o funcionamento da carga e o reativo para máquina se manter em operação. Em sequência, ao adicionar uma carga variável junto à lâmpada, em duas etapas diferentes, houveram novas quedas de tensão e aumentos da corrente. A variação da frequência está relacionada a variação da velocidade da máquina primária. Pequenas variações ocorreram, já que a principal vantagem do uso de motores de corrente contínua, é de controlar a velocidade e tensão de saída.

Devido a pobre regulação de tensão e às limitações de potência, este gerador é inviável para alimentar cargas indutivas, pois as mesmas provocariam a desmagnetização

da máquina. Como os materiais disponíveis em laboratórios não eram amplos, o uso de cargas foi restringido apenas para cargas resistivas. Abaixo segue algumas oportunidades para testes futuros:

- Acionamento de motores bifásicos de até 0,2 cv;
- Cargas residenciais monofásicas com tensão de 127V, utilizando 2 capacitores para divisão da fase, já que os enrolamentos da máquina são 220V/380V.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu em corroborar experimentalmente, a hipótese que Fukami em [14] propôs, de se utilizar geradores de indução em gaiola de esquilo, provendo a excitação da máquina por meio do dimensionamento de dois capacitores série C_s e um capacitor paralelo C_p conectados aos enrolamentos do estator do gerador, viabilizando o uso desta máquina como gerador portátil para poder alimentar cargas residenciais monofásicas.

A partir dos resultados obtidos na montagem experimental, foi possível analisar o perfil de tensão e frequência que as cargas resistivas forneceram, por meio da captura das formas de onda de tensão, corrente e potência. O resultado para este tipo de carga foi satisfatório, visto que o aumento gradual de carga impactou na queda de tensão do gerador e o conseqüentemente aumento de corrente, para que o reativo pudesse ser regulado.

Por outro lado, experimentalmente não foi possível obter bons resultados no controle manual da velocidade da máquina primária de corrente contínua durante o aumento de carga, visto que a frequência oscilou em relação ao valor nominal de 60 Hz.

Além disso, por limitações do gerador de indução, não foi possível que fosse utilizado outros tipos de cargas residenciais, como por exemplo ventiladores (indutiva) e lâmpadas de LED (não-linear), pois as mesmas poderiam desmagnetizar a máquina.

Apesar destas dificuldades, o uso do gerador de gaiola de esquilo na conexão Fukami como gerador portátil para operação isolada, ainda é mais viável que outras opções tradicionais, como geradores síncronos portáteis e grupos geradores movidos a diesel.

Para estudos futuros, muitas melhorias ainda são necessárias, como por exemplo, novas tecnologias para que máquinas de indução operando como gerador sejam mais robustas para alimentar diferentes cargas, além de utilizar melhor os capacitores, visto que neste projeto, não haviam muitas opções disponíveis no laboratório.

REFERÊNCIAS

- [1] A. E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR, S. D. UMANS. Máquinas Elétricas – Com introdução à eletrônica de potência. Tradução Anatólio Laschuk – 6.ed.- Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p
- [2] F. B. Silva, W. E. Vanco, F. A. da Silva Goncalves, C. A. Bissochi Junior, D. P. de Carvalho and L. M. Neto, "Experimental Analysis of Harmonic Distortion in Isolated Induction Generators," in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 3, pp. 1245-1251, March 2016.
- [3] CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**, 5nd ed. Boston: McGrawHill, 1991
- [4] HOMRICH, Guilherme. **Regulação de Tensão em Geradores de Indução**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- [5] GUIMARÃES, G. C.; OLIVEIRA, J. C. **Máquinas Síncronas e Estabilidade**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017
- [6] **Motor de Corrente Contínua**. USP. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1230461/mod_resource/content/1/MCC_Resumo.pdf>. Acesso em: 27 Mai 2019.
- [7] **Máquinas Síncronas**. UNESP. Disponível em <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5_eletrotecnica_fabioleao.pdf>. Acesso em: 27 Mai 2019.
- [8] **Máquinas Síncronas**. USP. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1264958/mod_resource/content/1/PEA%202400%20Notas%20de%20aula_4_revB.pdf>. Acesso em: 27 Mai 2019.
- [9] **Motores trifásicos de CA**. IFRN. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/aula-de-motores-trifasicos-de-ca>>. Acesso em: 27 Mai 2019.
- [10] CHAPALLAZ, J. M.; GLALI, J. D.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; **Manual on motors used as generators**; MHPG Series; Vol. 10; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany; 1990
- [11] TRAPP, Jordan Gustavo. **Gerador de indução isolado com tensão e frequência reguladas por conversor matricial esparsa**. / por Jordan Gustavo Trapp – Santa Maria (RS): [s.n.], 2008, 103 p.:il.
- [12] MEDEIROS, Daniel de Macedo. **A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica**. / por Daniel de Macedo Medeiros -- Itajubá (MG): [s.n.], 2004. 129 p.: il.

- [13] R. C. Bansal, "Three-phase self-excited induction generators: an overview," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 292-299, June 2005
- [14] T. Fukami, M. Imamura, Y. Kaburaki and T. Miyamoto, "A New Self-Regulated Self Excited Single-Phase Induction Generator using a Squirrel Cage Three-Phase Induction Machine", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 308-312, Aug. 2002. doi: 10.1109/EMPD.1995.500744
- [15] T. Fukami, Y. Kaburaki, S. Kawahara and T. Miyamoto, "Performance analysis of a self-regulated self-excited single-phase induction generator using a three-phase machine", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 622-627, Sep 1999. doi: 10.1109/60.790925.
- [16] Eyenubo, O. J., Otuagoma, S.O., "Perfomance analysis of a self-excited single-phase induction generator" in ATBU, Journal of Science, Technology & Education (JOSTE), Vol. 4, December, 2016. ISSN: 2277-0011
- [17] **Brasil vai importar energia? Há Risco de Crise?** FGV Energia. Disponível em: <<https://fgvenergia.fgv.br/noticias/brasil-vai-importar-energia-ha-risco-de-crise>>. Acesso em: 27 Mai 2019.
- [18] **O SIN em números.** ONS Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 27 Mai 2019.