

# *Geração de Energia Elétrica Utilizando um Motor de Indução Trifásico com Rotor Gaiola de Esquilo*

Rogério Botelho Lima<sup>1</sup>, Ivan Jorge Gabe<sup>2</sup>

TCC2 - Curso de Engenharia de Controle e Automação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Câmpus Farroupilha  
Farroupilha, Brasil

Discente<sup>1</sup>, orientador<sup>2</sup>

rogblima@gmail.com<sup>1</sup>, ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br<sup>2</sup>

**Resumo** — Este projeto faz parte da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS - Câmpus Farroupilha, e tem como objetivo, implementar um gerador de energia elétrica, utilizando um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo, operando como gerador e regulação da tensão de saída. O gerador de indução auto excitado é atrativo para geração de energia isolada, como fontes alternativas, por apresentar baixo custo, robustez, baixo índice de manutenção, grande disponibilidade comercial e facilidade de substituição, porém há algumas desvantagens no que tange a regulação da tensão e da frequência de saída do sistema. Foi utilizado um motor de corrente contínua como máquina primária e é considerada a operação em sistemas isolados da rede elétrica. Este trabalho consiste na obtenção dos parâmetros do motor de indução, no dimensionamento do banco de capacitores, imprescindíveis para sua auto excitação e o controle da tensão de saída, utilizando o método de controle do fluxo de potência reativa. Através das experiências realizadas, percebe-se que tanto o dimensionamento da auto excitação, como o método de controle utilizado, apresentaram resultados satisfatórios. Pois tais métodos, solucionaram tanto os problemas da desmagnetização do motor, como o da regulação da tensão. Os testes realizados com este gerador, foram apenas com carga resistiva, pois é o tipo de carga predominante em residências. O gerador de energia elétrica utilizando um motor com rotor em gaiola de esquilo, apresentou desempenho satisfatório, para operar isolado da rede elétrica.

**Palavras-chave** — Gerador de indução auto excitado; controle por fluxo de potência reativa; geração isolada da rede.

## I. INTRODUÇÃO

Por mais que passe despercebido no nosso cotidiano, vivemos em um mundo onde não é possível sobreviver sem energia elétrica. Ela está presente nas mais diversas áreas, como em hospitais, sistemas de comunicação, em nossa casa, nos mais simples momentos de lazer e etc. Em contrapartida segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em sua Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD contínua) [1], o serviço de energia elétrica proveniente da rede geral, companhias de distribuição, atende 99,5 % da população brasileira. Uma vez que a população estimada neste ano foi de 207,1 milhões, resulta assim em mais de 1 milhão de pessoas sem energia elétrica em suas residências no Brasil. A região Norte é a mais afetada pela falta de energia elétrica proveniente da rede geral, pois dispunha de 96,4 % deste serviço. Devido a essa baixa disponibilidade, é a região que mais tem participação

de domicílios que utilizam fonte alternativa de energia. As outras grandes regiões a proporção de disponibilidade do serviço varia de 99,5 % a 100 %.

O gerador de indução auto excitado (GIAE) quando conectado à rede elétrica, é capaz de gerar tensões trifásicas com frequência constante, mesmo se acionado com velocidade variável [2]. Além disso ele possui naturalmente a capacidade de auto proteção, pois no caso de uma sobrecarga o mesmo para de gerar energia, devido a desmagnetização do motor de indução (MI). Apesar das vantagens o gerador de indução (GI) quando operando de forma isolada, possui uma regulação de tensão insatisfatória e a frequência varia com a carga ou com a variação da velocidade da máquina primária (MP), tornando assim indispensável o uso de mecanismos de controle [3].

O objetivo deste trabalho é gerar energia elétrica a partir de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo (MITGE) acionado por uma MP, utilizando um banco de capacitores para sua auto excitação, e regulado a tensão de saída, através do método de controle do fluxo de potência reativa. Este gerador foi projetado para operar desconectado da rede de distribuição de energia elétrica. Os ensaios desse gerador foram efetuados apenas para carga resistiva, pois é o tipo de carga predominante em residências.

Neste trabalho não é contemplado o problema da variação da frequência, pois seria necessário utilizar outro método de controle, o qual não se dispõem dos materiais necessários, devido ao alto valor, bem como o tempo essencial para estudo do método, em razão da complexidade. Por isso a correção da variação da frequência será realizado manualmente, durante os ensaios.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O MITGE utilizado na ação geradora tem algumas peculiaridades a serem consideradas, pois operando em um sistema isolado, ele não tem de onde drenar energia reativa, indispensável para sua magnetização. Sendo assim, faz-se necessário uso de um banco de capacitores. O problema da regulação de tensão, ocorre do fato da variação de carga, equilibrada ou não, e também do seu tipo, lineares ou não lineares, aplicada ao gerador. A capacitância necessária para manter a tensão varia, originando as dificuldades técnicas para o projeto adequado do capacitor.

Segundo [4] o valor da capacitância do banco de capacitores, pode ser encontrado com base em curvas obtidas experimentalmente e equacionamento analítico apropriado, conforme apresentado em [5]. Dessa forma é possível atingir os valores nominais de tensão de saída do motor empregado, apesar do baixo nível de regulação da tensão. Afim de amenizar esta variação, ele conclui que é perceptível a necessidade da inclusão de algum método de controle, disponível na literatura, para atingir um nível satisfatório de regulação da tensão de saída com a variação da carga. Já em [6], eles propõem o cálculo do valor da capacitância, a partir da reatância de magnetização, com isso tem-se a capacitância e a potência reativa mínima para auto excitação. Este método mostrou-se eficiente, quando operando com carga abaixo da nominal, porém quando aplicado carga nominal, o gerador perde a auto excitação, sendo assim, imprescindível inserir um fator de acréscimo de 40 % a 50 %, ao valor obtido referente a potência reativa mínima. Após isto conseguiu-se operar com carga nominal. Da mesma forma que em [4] tanto a tensão de saída quanto à frequência oscilam com a variação da carga.

No que diz respeito a regulação de tensão para este tipo de gerador, a referência [7] apresenta cinco métodos de controle, quais sejam: Capacitor Série, Capacitores Chaveados, Controle de Fluxo de Potência Ativa, Controle de Fluxo de Potência Reativa e por Inversor de Frequência. Onde cada um dos métodos apresentados tem suas vantagens e desvantagens, cabendo uma análise do perfil de carga para sua determinação. Dentre estas técnicas, o autor conclui que, o método que apresentou o melhor desempenho transitório para todos os tipos de cargas, foi o de regulação por inversor de frequência, que controla o fluxo global de potência reativa no sistema e a frequência da corrente reativa. Este método, possibilita melhorar a regulação da tensão e a frequência, no entanto, o custo e a complexidade são elevados, e está estritamente vinculado ao perfil de carga a ser alimentada.

O controle de fluxo por potência reativa, consiste em adicionar potência indutiva ao sistema, conforme a necessidade, cuja finalidade é drenar a potência reativa excedente gerada pelo banco de capacitores, com isso mantendo a tensão no valor desejado. O diagrama de blocos da Figura 1, ilustra este sistema evidenciando as etapas vitais para seu funcionamento.

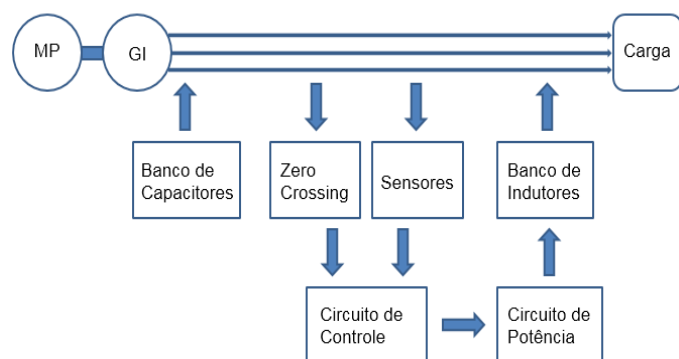


Figura 1: Sistema completo.

Escolheu-se o método de controle por fluxo de potência reativa, para a regulação da tensão do GIAE, pois este possui o

melhor desempenho possível, no que diz respeito aos materiais e tempo disponíveis.

Para um melhor entendimento deste artigo, a seção III apresenta dois tipos de MI operando como gerador de energia elétrica, o funcionamento do GI e suas limitações, a determinação dos parâmetros do MI e o dimensionamento do banco de capacitores para auto excitação do GI. Na seção IV mostra-se, os equipamentos, os instrumentos, os hardwares utilizados e desenvolvidos e seus funcionamentos, os sensores e atuadores, bem como a metodologia realizada na execução do trabalho. A seção V exhibe as formas de onda e tabelas, obtidas nos ensaios do protótipo. Já na seção VI, comenta-se as consequências dos resultados dos métodos utilizados e na seção referências, os trabalhos e os livros em que baseou-se para a realização deste projeto.

### III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### A. O Motor de Indução

Neste tipo de motor, a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, e este transmite a corrente ao rotor, por indução, por isso dá-se o nome motor de indução. Quando está máquina for alimentada por uma fonte polifásica equilibrada, um campo magnético é produzido no entreferro, com isso girando-o na velocidade síncrona [8]. Essa velocidade é obtida através da Equação 1.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Onde,

$n_s$  é a velocidade síncrona [RPM];

$f$  é a frequência do estator [Hz].

$p$  é o número de polos.

O rotor de um MI pode ser constituído de dois tipos, o bobinado e o gaiola de esquilo [8]. O MI bobinado é construído semelhante ao estator, tendo o mesmo número de polos. Os terminais dos enrolamentos, são conectados a anéis deslizantes isolados, montados sobre o eixo e as escovas apoiadas sobre estes anéis, permitindo assim que os terminais sejam acessados externamente ao motor, como pode ser visto na Figura 2. Este tipo de motor é pouco utilizado, sendo encontrado apenas em aplicações específicas.

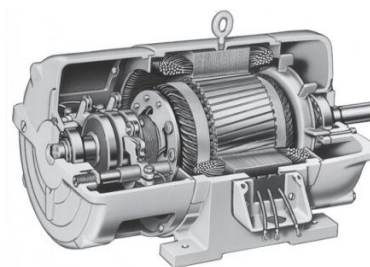


Figura 2: Motor de indução trifásico de rotor bobinado [9].

Por outro lado, o enrolamento do MITGE, consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor, e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. A extrema simplicidade e robustez da construção, fazem deste tipo de

motor o mais utilizado, tanto em máquinas de pequeno como de grande porte. A Figura 3 exhibe este tipo de motor.

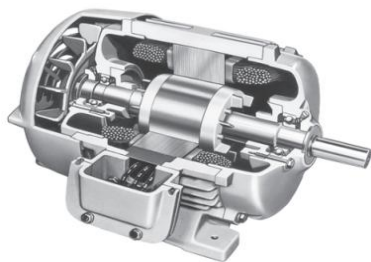


Figura 3: Motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo [9].

A diferença relativa entre a velocidade síncrona e a do rotor de um MI é chamado de escorregamento, este é obtido por meio da Equação 2.

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} * 100 \quad (2)$$

Em que,

$s$  é o escorregamento [%]

$n_n$  é a rotação nominal do motor [RPM].

### B. O Gerador de Indução

Um motor de indução trifásico (MIT) assíncrono pode ser operado como um GI, desde que, seja acionado por uma MP externa a uma velocidade acima da síncrona. Dessa maneira resulta em um escorregamento negativo e o sentido do seu conjugado induzido será invertido, sendo assim, operando como gerador, conforme mostra a Figura 4. Como pode-se observar, enquanto a velocidade da MP for superior a velocidade síncrona, o MIT funcionará como gerador e quanto maior o conjugado aplicado ao seu eixo, até um certo ponto, maior será a potência de saída.

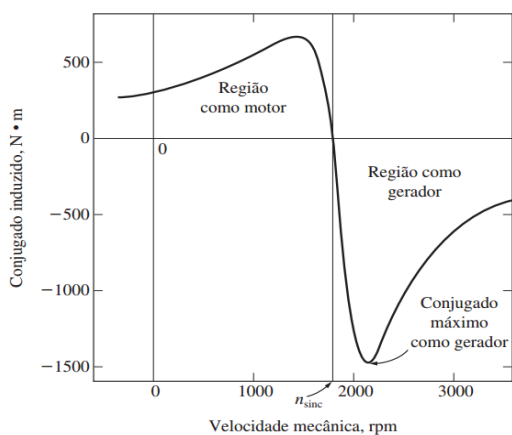


Figura 4: Curva característica da velocidade versus conjugado, mostrando a região de funcionamento como gerador [9].

O GI tem diversas limitações [9], pois como lhe falta um circuito de campo separado, ele não pode produzir potência reativa. Por este motivo, se faz necessário o uso de um banco de capacitores, ligado em paralelo ao MI, fornecendo a potência reativa, necessária para sua auto excitação, bem como quaisquer cargas acopladas ao gerador. A Figura 5 mostra o esquemático do GIAE operando isolado.

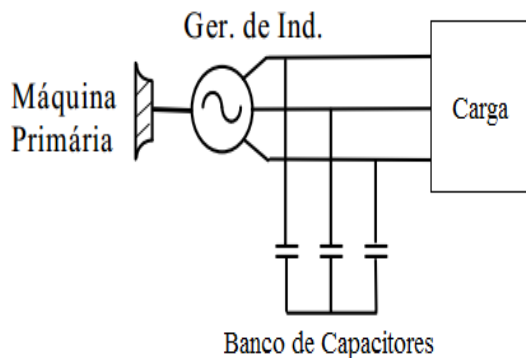


Figura 5: GIAE operando desconectado da rede elétrica, editado de [3].

### C. Determinação dos Parâmetros do Motor

O circuito equivalente de um MI, mostrado na Figura 6, é uma ferramenta muito importante para determinar a resposta da máquina às mudanças de carga. Para obter os parâmetros do motor é necessário executar três tipos de ensaios [9], ensaio sem carga ou a vazio, ensaio de rotor bloqueado e o ensaio de corrente contínua ou ensaio CC.

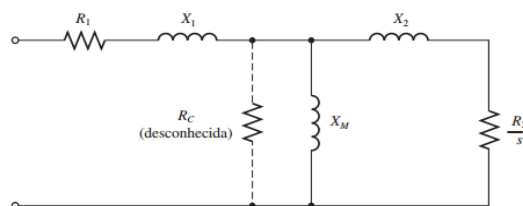


Figura 6: Circuito equivalente por fase do MIT, modificado de [9].

Onde  $R_1$  e  $X_1$  correspondem respectivamente a resistência e a reatância do estator. Os elementos  $R_2/s$  e  $X_2$  representam nessa ordem a resistência e reatância do rotor. Já o termo,  $R_c$  e  $X_M$ , constituem a resistência das perdas e reatância de magnetização do núcleo, respectivamente. Onde a  $R_c$  é desprezada [9], pois ela é substancialmente maior que a reatância de magnetização, e como estas estão em paralelo, resulta em aproximadamente só a reatância de magnetização.

#### 1) Ensaio CC

O Ensaio de Corrente Contínua, tem o objetivo de determinar a resistência do estator. Basicamente é aplicada uma tensão CC, utilizando uma fonte de tensão contínua ajustável, aos enrolamentos do estator do motor, como a corrente é contínua, não haverá tensão induzida no circuito do rotor e a reatância do motor é zero nesta situação. A Figura 7 exhibe o circuito, bem como os instrumentos, voltímetro e amperímetro, imprescindíveis para o ensaio.

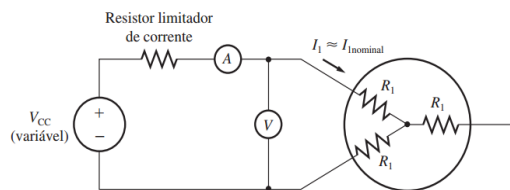


Figura 7: Circuito usado no ensaio CC [9].

Os enrolamentos do MIT são ligados em estrela, deixando uma das bobinas em aberto, como mostra a Figura 7, isto é feito para atingir uma melhor precisão no resultado. Para garantir que não irá danificar o motor, a tensão da fonte tem que ser ajustada levando em consideração a corrente nominal do motor. A resistência do estator, dada em ohms, será obtida através da Equação 3.

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{2 * I_{cc}} \quad (3)$$

Na qual,

$V_{cc}$  é a tensão contínua [V].

$I_{cc}$  é a corrente contínua [A].

### 2) Ensaio a Vazio

Como o nome já pressupõe, é energizado o motor com uma fonte de tensão e frequência variável, sem nenhuma carga acoplada ao seu eixo. Neste teste é possível determinar as perdas por atrito e ventilação, pois são as únicas cargas presentes no motor. O principal motivo de realizar este ensaio é obter a reatância do motor operando a vazio, pois esta variável é imprescindível para a determinação da reatância de magnetização, que é obtida através do ensaio de rotor bloqueado. O circuito com os instrumentos, voltímetro, wattímetro e amperímetro, necessários para este ensaio é apresentado na Figura 8.

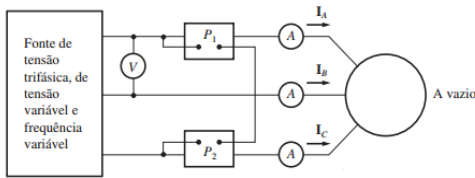


Figura 8: Circuito usado no ensaio a vazio [9].

Para obter os valores das perdas no cobre do estator e as rotacionais, foram utilizadas as seguintes Equações 4, 5 e 6.

$$X_v = \frac{V_{fv}}{I_{fv}} \quad (4)$$

$$P_{PC} = 3 * I_{fv}^2 * R_1 \quad (5)$$

$$P_{PR} = P_v - P_{PC} \quad (6)$$

Onde,

$X_v$  é a reatância a vazio [ $\Omega$ ].

$V_{fv}$  é a tensão de fase a vazio [V].

$I_{fv}$  é a corrente média de fase a vazio [A].

$P_{PC}$  é a potência perdida no cobre [W].

$P_{PR}$  é a potência das perdas rotacionais [W].

$P_v$  é a potência a vazio [W].

### 3) Ensaio Rotor Bloqueado

Neste ensaio o rotor é travado de modo que o eixo não consiga se mover, e em seguida variado a tensão aplicada, com uma fonte trifásica de tensão e frequência ajustável, até que a

corrente chegue a nominal do motor, e medido a tensão, a corrente e a potência resultantes. A IEEE sugere uma frequência, para este ensaio, de 25 % da frequência nominal. A Figura 9 mostra o circuito com o equipamento e os instrumentos utilizado para este ensaio.

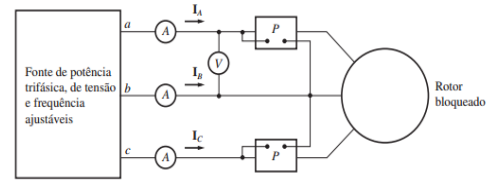


Figura 9: Circuito usado no ensaio de rotor bloqueado [9].

Com os dados obtidos deste teste, consegue-se determinar os parâmetros,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $R_2$ . Abaixo segue as Equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 utilizadas para determinar estes parâmetros.

$$X_b = \frac{V_{fb}}{I_{fb}} \quad (7)$$

$$S_b = \sqrt{3} * V_{fb} * I_{fb} \quad (8)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P_b}{S_b}\right) \quad (9)$$

$$R_b = X_b * \cos \varphi \quad (10)$$

$$R_2 = R_b - R_1 \quad (11)$$

$$'X_{rb} = X_b * \sin \varphi \quad (12)$$

$$X_{rb} = \left(\frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}}\right) * 'X_{rb} = X_1 + X_2 \quad (13)$$

$$X_M = X_v - X_1 \quad (14)$$

Em que,

$X_b$  é a reatância de rotor bloqueado [ $\Omega$ ].

$V_{fb}$  é a tensão de fase de rotor bloqueado [V].

$I_{fb}$  é a corrente média de fase de rotor bloqueado [A].

$S_b$  é a potência aparente de rotor bloqueado [VA].

$P_b$  é a potência de rotor bloqueado [W].

$\varphi$  é o ângulo entre a tensão e a corrente [ $^\circ$ ].

$R_b$  é a resistência de rotor bloqueado [ $\Omega$ ].

$'X_{rb}$  é a reatância de rotor bloqueado na frequência que foi realizado o ensaio [ $\Omega$ ].

$X_{rb}$  é a reatância de rotor bloqueado na frequência nominal do motor [ $\Omega$ ].

A fim de se obter as indutâncias, dadas em henry, do estator, do rotor e a de magnetização, utiliza-se a Equação 15.

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (15)$$

Na qual,  $X_L$  é a reatância indutiva [ $\Omega$ ].

Para calcular as reatâncias do estator e do rotor é fundamental o uso da Tabela I, pois estas variáveis estão em função do tipo de rotor.

Tipo de Rotor	X <sub>1</sub> e X <sub>2</sub> em função de X <sub>rb</sub>	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
Rotor Bobinado	0,5X <sub>rb</sub>	0,5X <sub>rb</sub>
Classe A	0,5X <sub>rb</sub>	0,5X <sub>rb</sub>
Classe B	0,4X <sub>rb</sub>	0,6X <sub>rb</sub>
Classe C	0,3X <sub>rb</sub>	0,7X <sub>rb</sub>
Classe D	0,5X <sub>rb</sub>	0,5X <sub>rb</sub>

Tabela I: Distribuição empírica de reatâncias de dispersão em motores de indução, editado de [9].

#### D. Dimensionamento do Banco de Capacitores

Uma das formas de se obter o valor da capacitância necessária para a auto excitação do gerador, é através da curva de magnetização ou saturação do motor [10]. A fim de se obter esta curva, aciona-se o GI com uma MP na velocidade síncrona, verificando ela com um tacômetro, com isso fazendo o escorregamento tender a zero. Portanto o termo  $R_2/s$ , que pode ser visto na Figura 6, torna-se uma impedância muito grande, dessa forma, praticamente toda a corrente flui pela impedância de magnetização. Variando-se a tensão da fonte de alimentação do GI, desde zero até a sua corrente de placa, medindo-se a tensão e a corrente correspondente aos pares ordenados. De posse destes dados obtém-se a curva de magnetização. Como a corrente reativa que um capacitor pode fornecer é diretamente proporcional a tensão que lhe é aplicada, assim todas as possíveis combinações de tensão e corrente de um capacitor formam uma linha reta. Conforme ilustra a Figura 10, a intersecção das duas curvas, é o ponto onde a potência reativa demandada pelo gerador é suprida pelos capacitores, e também a tensão de saída quando o gerador estiver a vazio.

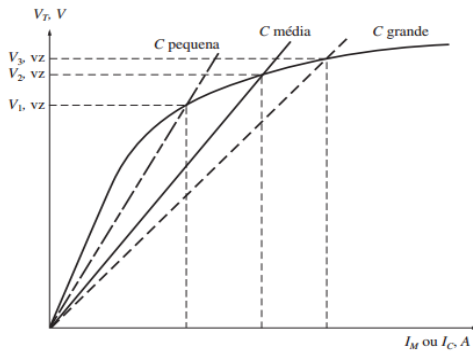


Figura 10: Curva de magnetização e três possíveis pontos de operação com sua determinada capacitância [9].

Baseado na Figura 10, define-se o ponto de operação do gerador, e em seguida utiliza-se a Equação 16, afim de se obter o valor da capacitância por fase, essencial para a auto excitação.

$$C = \frac{I_f}{2\pi f V_f} \quad (16)$$

Onde,

$C$  é a capacitância [uF].

$I_f$  é a corrente de fase [A].

$V_f$  é a tensão de fase [V].

O processo da auto excitação do gerador [9] ocorre desde que um capacitor de valor adequado, esteja conectado em paralelo a máquina. O processo inicia-se quando o GI é acionado através da MP, o magnetismo residual presente no seu circuito, produz uma pequena tensão. Essa produz um fluxo capacitivo de corrente, que faz aumentar a tensão, isso por sua vez, aumenta mais a corrente capacitiva e assim por diante, até que atinja a velocidade nominal. Portanto, para cada valor de capacitância e velocidade de acionamento do rotor, tem-se um ponto de operação diferente.

#### IV. PROPOSTA

O MITGE utilizado como gerador, bem como, o motor de corrente contínua usado como MP, foram selecionados conforme disponibilidade do laboratório do Instituto Federal, estes estão com suas características descritas abaixo.

Motor de Indução Trifásico Eberle:

- Potência: 2 CV;
- Tensão: 220/380 Vac;
- Corrente: 6,9/4,0 A;
- Isolação: B;
- Frequência: 60 Hz;
- Rotação: 1730 rpm;

Motor de Corrente Contínua Siemens:

- Potência: 1,1 kW;
- Tensão: 220 Vcc;
- Corrente: 6,5 A;
- Tensão Armadura: 180 Vcc;
- Corrente Armadura: 1,39 A;
- Rotação: 2000 rpm;

Para realização deste projeto, foram empregados, uma fonte de alimentação alternada trifásica ajustável de 0 a 400 Vac, uma fonte de alimentação de corrente contínua fixa de 24 Vcc e os instrumentos apresentados na Tabela II.

Instrumentos	Modelo	Fabricante
Analizador de energia	RE6000	Embrasul
Tacômetro	DM6236P	Victor
Amperímetro	375	Fluke
Osciloscópio	TPS 2024B	Tektronix

Tabela II: Instrumentos necessários para execução dos ensaios.

Foi efetuado a ligações, do MIT e do banco de capacitores na configuração estrela.

Devido às limitações referente aos valores das cargas disponíveis, os ensaios com carga, a determinação do indutor e o controle da tensão de saída, foram implementados apenas na fase R do gerador.

Outro impeditivo para a realização do ensaio com o sistema equilibrado, foi o variac utilizado para variar a tensão da máquina primária. A potência máxima dele é inferior a exigida, quando o GIAE está operando com carga equilibrada de 200  $\Omega$ .

#### A. Determinação dos Parâmetros do Motor

Realizou-se os ensaios, CC, a vazio e de rotor bloqueado, conforme descrito na seção fundamentação teórica. Porém tanto o ensaio a vazio como no de rotor bloqueado, não foi utilizado uma fonte de tensão com frequência ajustável. Os efeitos da frequência são desprezados frequentemente em motores abaixo de 25 HP [8], devido a isso, a impedância de rotor bloqueado pode ser medida diretamente na frequência de operação do motor.

#### B. Dimensionamento da Auto Excitação

O dimensionamento do banco de capacitores, utilizados para auto excitação do gerador, foi realizado de acordo com o exposto na seção fundamentação teórica. De posse dos dados, que estão na Tabela III, foi gerado a curva de magnetização do motor, Figura 11.

Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)
0,1	10,5	1,7	188,5
0,2	20,6	1,8	194,4
0,3	33,7	1,9	200,1
0,4	48,0	2,0	204,0
0,5	59,7	2,1	207,3
0,6	71,4	2,2	210,7
0,7	82,5	2,3	213,5
0,8	94,6	2,4	216,8
0,9	105,8	2,5	219,0
1,0	118,9	2,6	221,1
1,1	130,5	2,7	224,0
1,2	141,8	2,8	226,1
1,3	153,2	2,9	228,0
1,4	163,9	3,0	229,7
1,5	173,5	3,1	231,1
1,6	180,9	3,2	232,4

Tabela III: Dados do ensaio do levantamento da curva de magnetização.

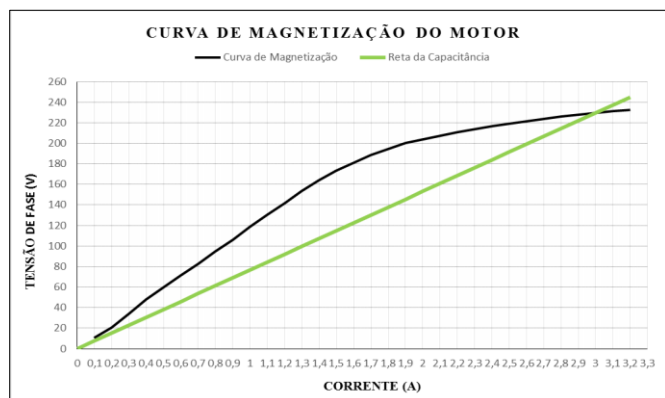


Figura 11: Gráfico da curva de magnetização do motor.

Como visto anteriormente, a relação da tensão e da corrente no capacitor formam uma linha reta. Dessa forma, definiu-se um

ponto na curva de magnetização do MI, Figura 11, tensão de 230 Vac e conseqüentemente a corrente de 3,0 A. A tensão definida deve ser superior a tensão de operação do GIAE, contudo não aconselha-se uma tensão muito mais alta, pois quanto maior a capacitância, maior a corrente drenada pelo capacitor. De posse dos dados, tensão e corrente de magnetização do MI, consegue-se obter o valor da capacitância por fase através da Equação 16.

#### C. Sistema de Controle e Periféricos

Utilizou-se a placa Arduino, que contém o microcontrolador Atmega2560 [11], que pode ser visto na Figura 12, para o controle da tensão de saída do gerador, bem como a leitura dos sensores, que medem a tensão da rede. Nele foi programado o software imprescindível para a aplicação.



Figura 12: Arduino Mega.

A fim de obter a tensão na saída do GIAE, utilizou-se um sensor, Figura 13. Este tem a capacidade de medir sinais de 0 a 250 Vac e fornece em sua saída um sinal senoidal de 0 a 5 Vdc, podendo ser ajustado através do trimpot. Para o seu funcionamento é necessário alimentar com 5 Vdc.



Figura 13: Sensor de tensão AC.

Para executar o método de controle por fluxo de potência reativa, é indispensável saber o exato momento em que a senóide do sinal de saída do gerador passar por zero. Por este motivo foi projetado o circuito da Figura 14. Basicamente o funcionamento do circuito dá-se da seguinte forma; o sinal após retificado é oscilatório, pois não é filtrado, sendo assim, ligando e desligando o opto acoplador (4N25) [12] a uma frequência de 2 vezes a de entrada, em seguida este sinal é comparado pelo amplificador operacional (LM741) [13], quando a tensão no amplificador ultrapassar os 2,5 Vcc, este aciona a sua saída.

A parte superior do circuito apresentado na Figura 14, é uma fonte de alimentação de 5 Vcc, empregada para fornecer a energia vital ao circuito de detecção da passagem do sinal por zero.



Assim como o indutor, o  $K_p$  também foi obtido de forma empírica. Obteve-se o ganho proporcional da seguinte maneira, com o sistema em malha aberta, definiu-se o  $r$  na tensão de operação do GIAE, e atribuiu-se valores tanto para  $K_p$  como para o erro, e na seqüência analisado a resposta da Equação 20. Posteriormente verificou-se o comportamento do GIAE, com o valor escolhido para o ganho proporcional.

## V. RESULTADOS

Afim de se obter os dados de forma experimental, foi montado em uma bancada, no laboratório do IFRS, os dois motores, o banco de resistores e o de indutores, utilizados para implementação do GIAE, conforme disposto na Figura 17.



Figura 17: Bancada utilizada para ensaiar o GIAE.

### A. Determinação dos Parâmetros do Motor

Os dados obtidos através dos ensaios CC, a vazio e de rotor bloqueado, estão dispostos na Tabela IV.

Ensaio CC			
Tensão (V)		Corrente (A)	
29,6		4,0	
Ensaio a Vazio			
Tensão (V)	Corrente (A)	P. Ativa (W)	P. Aparente (VA)
$V_A = 219$	$I_A = 2,47$	$P_A = 76,6$	$S_A = 542$
$V_B = 220$	$I_B = 2,50$	$P_B = 78,9$	$S_B = 554$
$V_C = 220$	$I_C = 2,65$	$P_C = 72,4$	$S_C = 587$
Ensaio de Rotor Bloqueado			
Tensão (V)	Corrente (A)	P. Ativa (W)	P. Aparente (VA)
$V_A = 45,64$	$I_A = 4,00$	$P_A = 109,2$	$S_A = 181,5$
$V_B = 46,45$	$I_B = 3,89$	$P_B = 102,8$	$S_B = 179,7$
$V_C = 46,67$	$I_C = 4,14$	$P_C = 112,2$	$S_C = 192,1$

Tabela IV: Dados dos ensaios.

Por meio dos elementos da Tabela IV e o equacionamento apropriado, obteve-se os parâmetros do circuito equivalente por fase do motor. A Tabela V apresenta estas informações.

Parâmetros	Valores ( $\Omega$ )
Resistência do Estator	3,70
Reatância de Dispersão do Estator	4,67
Resistência do Rotor	3,06
Reatância de Dispersão do Rotor	4,67
Reatância de Dispersão de Magnetização	81,94

Tabela V: Parâmetros do motor.

### B. Dimensionamento da Auto Excitação

O valor da capacitância encontrada, com base na curva de magnetização, foi  $34,6 \mu F$ . Contudo utilizou-se um capacitor de  $25 \mu F$  ligado em paralelo com outro de  $10 \mu F$ , por fase, ambos  $380 \text{ Vac}$ .

Após determinar os capacitores, foram realizados alguns testes, com o intuito de verificar se o dimensionamento estava correto. Foi conectado o banco de capacitores, na configuração estrela e em paralelo ao GI, conforme a Figura 5, porém sem carga, e verificado a tensão de fase e a corrente respectivamente, utilizando o analisador de energia. Posteriormente foi conectado ao GIAE, a carga máxima disponível, que é  $200 \Omega$ . As decorrências dessas experiências, são apresentadas na Tabela VI.

	A vazio		Carga de $200 \Omega$		
	Fase	Gerador	Gerador	Capacitor	Carga
Tensão (V)	R	242	231	231	231
	S	249	249	249	
	T	241	241	241	
Corrente (A)	R	3,4	3,5	3,2	1,1
	S	3,3	3,2	3,5	
	T	3,5	3,5	1,4	

Tabela VI: Dados obtidos dos ensaios a vazio e com carga de  $200 \Omega$ .

Com base nos resultados, da Tabela VI, verificou-se que o dimensionamento do capacitor está correto. Quando operado o GIAE sem carga, a tensão ficou um pouco superior ao esperado, porém esse efeito não é considerado um problema, pois quando adicionado o sistema de controle, este fará com que a tensão baixe para o nível de operação. Quando inserido a carga de  $200 \Omega$ , o gerador não se desmagnetizou e também não ficou abaixo do limite mínimo definido.

### C. Sistema de Controle e Periféricos

Foi montado o circuito da figura 14, com a finalidade de atestar o seu funcionamento, para isso, aplicou-se a tensão de fase de  $220 \text{ Vac}$  nos terminais de entrada do transformador, e medido na saída do circuito, pinos 6 do amplificador operacional e no GND. A Figura 18 apresenta o resposta do circuito.

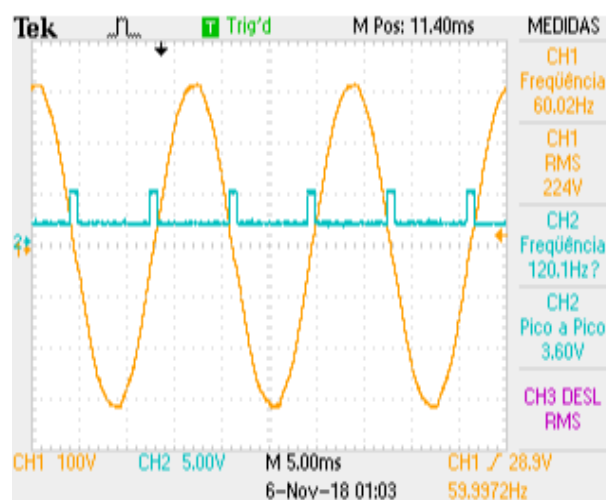


Figura 18: Funcionamento circuito detector de passagem por zero.

A metodologia utilizada para o dimensionamento do indutor deu-se da seguinte forma; primeiramente deixou-se o gerador operando a vazio, em seguida conectado aos seus terminais, um indutor com 513 mH. Posteriormente retirou-se o indutor de 513 mH e adicionou-se outro com 256 mH de indutância. Os efeitos destes ensaios, são apresentados na Tabela VII.

Gerador Operando com Indutor 513 mH		
	Tensão (V)	Corrente (A)
Gerador	221	2,1
Capacitor	221	3
Indutor	221	1,1
Gerador Operando com Indutor 256 mH		
	Tensão (V)	Corrente (A)
Gerador	195	0,7
Capacitor	195	2,4
Indutor	195	1,9

Tabela VII: As informações coletadas dos testes, para determinar o indutor.

Com base na Tabela VII, definiu-se a indutância a ser utilizada, que foi de 513 mH. Pois esta conseguiu manter a tensão, de saída do GIAE, dentro do range estabelecido.

O valor ideal do  $K_p$ , obteve-se conforme proposto. O controlador atingiu o *setpoint* e se manteve dentro dos limites definidos, de maneira eficaz, com a constante ajustada em 2.

Para atestar o desempenho do GIAE, com os periféricos e sistema de controle implementado, realizou-se os ensaios na seguinte sequência; no começo o GIAE operou sem carga, em seguida adicionou-se, em seus terminais, a carga de 600  $\Omega$ , posteriormente retirou-se a carga de 600  $\Omega$  e inseriu-se uma de 400  $\Omega$ , e por fim, removeu-se a de 400  $\Omega$  e colocou-se a carga de 200  $\Omega$ . Os resultados das formas de onda, estão apresentados na devida ordem, da Figura 19 até a 22. Durante cada etapa desses testes, foram medidas as tensões, as correntes e as potências, estes dados bem como o ângulo de disparo do triac, estão dispostos na Tabela VIII até a XI.

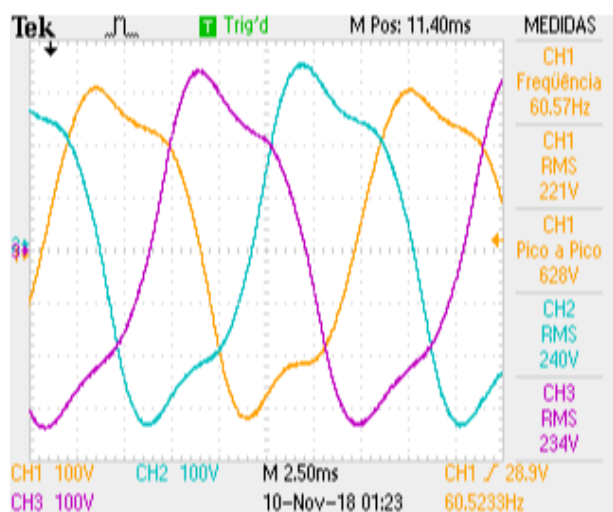


Figura 19: Gerador com tensão estabilizada operando sem carga.

Descrição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (VAR)	Ângulo de disparo (°)
Gerador	221	2	- 442	-
Capacitor	221	3	- 663	-
Indutor	210	1	210	27

Tabela VIII: GIAE operando sem carga e com o sistema de controle.

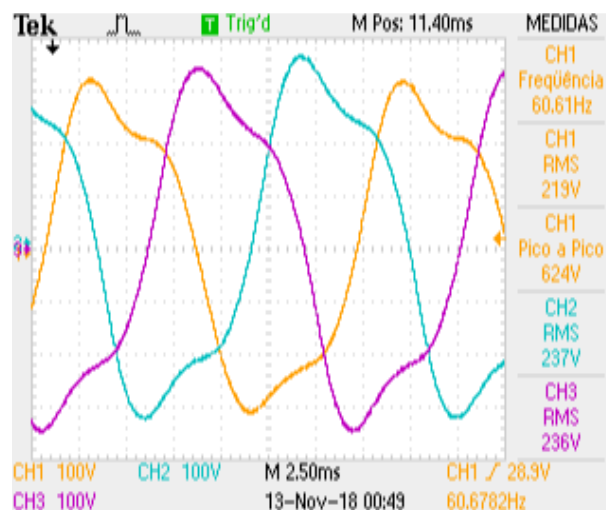


Figura 20: Gerador com tensão estabilizada operando com carga de 600  $\Omega$ .

Descrição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência	Ângulo de disparo (°)
Gerador	219	2,4	- 526 $V_{AR}$	-
Capacitor	219	3,1	- 679 $V_{AR}$	-
Indutor	202	0,8	162 $V_{AR}$	46
Carga	219	0,3	65,7 W	-

Tabela IX: GIAE operando com carga de 600  $\Omega$  e com o sistema de controle.

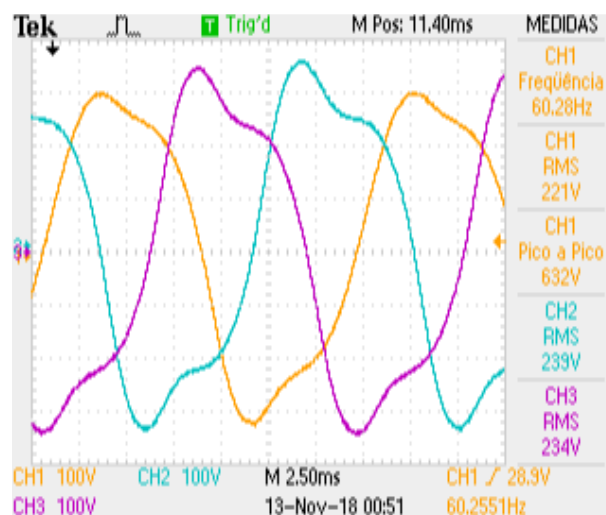
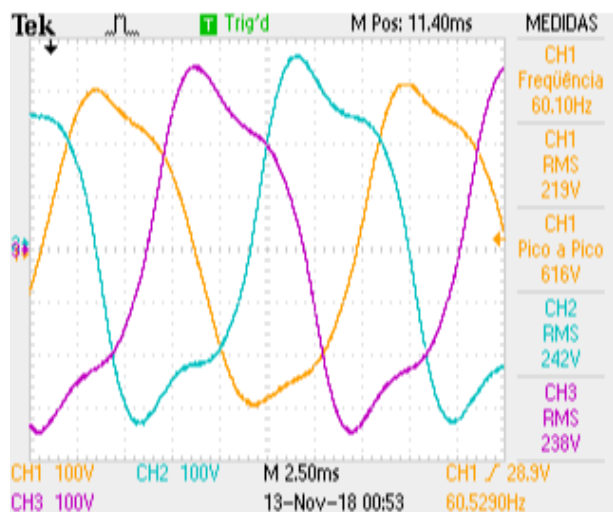


Figura 21: Gerador com tensão estabilizada operando com carga de 400  $\Omega$ .

Descrição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência	Ângulo de disparo (°)
Gerador	221	2,4	- 530 $V_{AR}$	-
Capacitor	221	2,9	- 641 $V_{AR}$	-
Indutor	195	0,8	156 $V_{AR}$	52
Carga	221	0,5	110,5 W	-

Tabela X: GIAE operando com carga de 400  $\Omega$  e com o sistema de controle.Figura 22: Gerador com tensão estabilizada operando com carga de 200  $\Omega$ .

Descrição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência	Ângulo de disparo (°)
Gerador	219	2,5	- 547 $V_{AR}$	-
Capacitor	219	2,9	- 635 $V_{AR}$	-
Indutor	157	0,6	94 $V_{AR}$	104
Carga	219	1,1	241 W	-

Tabela XI: GIAE operando com carga de 200  $\Omega$  e com o sistema de controle.

Como pode ser visto nas figuras 19, 20, 21 e 22, as formas de onda ficam um pouco distorcidas, isso se deve ao conteúdo harmônico de 180 Hz, provenientes da saturação do núcleo magnético que induz as tensões. Estas distorções não costumam ser um limitador ao uso de motores de indução na ação geradora, dependendo das necessidades das cargas, tais como, qualidade de energia e cargas especiais. Para cargas lineares e geração isolada da rede, essas distorções não causam problemas.

Depois de cada etapa dos ensaios, da Figura 19 até a 22, foi ajustado manualmente a frequência do gerador, pois quando inserido carga ao gerador, a frequência é reduzida. Quando aplicado a carga de 200  $\Omega$ , que é a carga que exige maior potência do GIAE, a frequência baixa para 55 Hz. Como já mencionado anteriormente, esse problema não é tratado nesse trabalho.

A potência indutiva inserida na rede do GIAE diminui conforme é inserida carga a ele, a final esse é o propósito deste método de controle, pois a carga drena uma parcela da potência reativa excedente, fornecida pelo banco de capacitores. Dessa forma o ângulo de disparo do tiristor aumenta, pois a potência indutiva necessária para a regular a tensão de saída do GIAE é menor.

Percebe-se através dos resultados destas últimas experiências, que a tensão no GIAE se manteve dentro dos parâmetros definidos, desde operando a vazio até quando inserido a carga de 200  $\Omega$ , dessa maneira, comprovando o funcionamento dos métodos utilizados para o seu desenvolvimento.

O hardware utilizado para a implementação do sistema de controle, é mostrado na Figura 23.

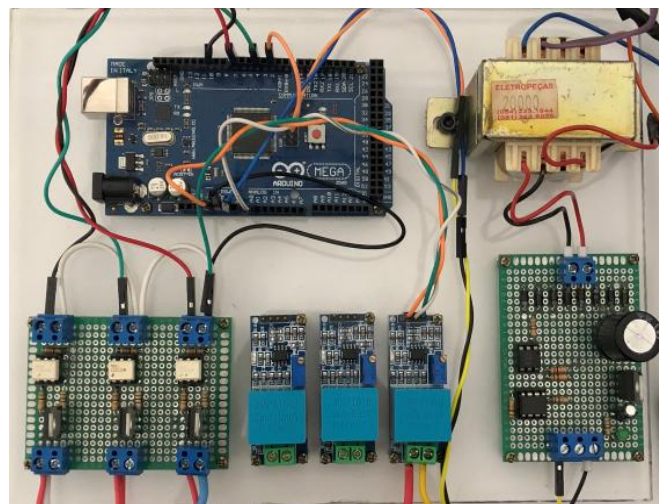


Figura 23: Hardware desenvolvido.

## VI. CONCLUSÃO

Baseado nos dados obtidos através da realização desse trabalho, percebe-se que o dimensionamento do banco de capacitores, por meio do levantamento da curva de magnetização, apresentou-se satisfatório, pois em nenhum momento o gerador se desmagnetizou.

O método de controle do fluxo de potência reativa, apresentou um funcionamento adequado, pois em todos os testes realizados, ele manteve a tensão dentro dos parâmetros estabelecidos. Para sua implementação, exigiu um estudo e conhecimento mais apurado, pois este necessita saber o exato momento em que sinal de saída do gerador passa por zero. Também se fez necessário desenvolver o circuito de potência para o chaveamento dos indutores.

Considerando o controle independente das três fases, o mais indicado, seria utilizar um processador com pelos menos três núcleos de processamento, ou outro que tenha uma máquina de estados ou arquitetura que deem flexibilidade no ajuste dos timers e sequência de interrupção. Quando utilizado um processador com apenas um núcleo, a interrupção externa, gerada pelo circuito de detecção de passagem por zero, tem prioridade em relação a interrupção interna, utilizada para realizar o sincronismo das três fases. Devido a isso, faz com que seja interrompido a contagem de tempo, por consequência dessincronizando a geração de pulsos para os tiristores.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se utilizar uma estrutura de controle com uma faixa de histerese menor e um controlador Proporcional Integral, para zerar o erro no controle da tensão, o que não foi implementado neste trabalho devido a limitação de tempo.

O gerador de energia elétrica utilizando um motor com rotor em gaiola de esquilo, apresentou desempenho satisfatório, para operar isolado da rede elétrica. Se utilizado como máquina primária um motor a combustão, que ainda é o mais utilizado, o problema da variação da frequência do sistema, pode ser eliminada. Fazendo uso de um sensor para medir a velocidade do motor de indução, com isso, consegue-se fechar uma malha de controle com o módulo de injeção eletrônica que faz parte do motor a combustão. Com este artifício, torna-se possível manter constante a velocidade do GIAE. Dessa forma, obtém-se mais uma alternativa com relação a geração de energia elétrica com baixo custo, para áreas isoladas, onde as companhias de distribuição de energia não atendem.

#### REFERÊNCIAS

- [1] IBGE. “Pesquisa nacional por amostra de domicílios contínua,” [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101566\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101566_informativo.pdf). Acesso: 14 de maio de 2018.
- [2] E. D. BASSETT and F. M. POTTER, “Capacitive excitation of induction generators,” *Transactions AIEE*, vol. 54, pp. 540-545, May 1935.
- [3] E. G. MARRA and J. A. POMILIO, “Sistemas de geração baseados em gerador de indução operando com tensão regulada e frequência constante,” *SBA Controle & Automação*, vol. 11, no. 01, Jan., Fev., Mar, Abr. 2000.
- [4] G. G. FONSECA, “Especificação da auto excitação e ensaios em um motor de indução trifásico rotor em gaiola operando como gerador,” Instituto Federal de São Paulo, Dez. 2013.
- [5] J. M. CHAPALLAZ, J. D. GHALI, P. EICHENBERG and G. FISCHER, “Manual on induction motors used as generators,” *MHPG Series*, v. 10, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Germany, 1990.
- [6] W. E. VANÇO, F. B. SILVA, F. A. S. GONÇALVES and C. A. J. BISSOCHI, “Evaluation of the capacitor bank design for self-excitation in induction generators,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 2, Feb. 2018.
- [7] G. HOMRICH, “Regulação de tensão em geradores de indução,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- [8] A. E. FITZGERALD, C. J. KINGSLEY and S. D. UMANS, “Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência,” 6ª ed., Editora Bookman, 2008.
- [9] S. J. CHAPMAN, “Fundamentos de máquinas elétricas,” 5ª ed., AMGH Editora Ltda, 2013.
- [10] M. G. SIMÕES and F. A. FARRET, “Modeling and analysis with induction generators,” 3ª ed., Boca Raton, Flórida, EUA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- [11] *Datasheet* Arduino Mega. Disponível em: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf). Último acesso em: 11/11/2018.
- [12] *Datasheet* Opto acoplador para tensão contínua. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>. Último acesso em: 11/11/2018.
- [13] *Datasheet* Amplificador Operacional. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>. Último acesso em: 11/11/2018.
- [14] *Datasheet* Opto acoplador para tensão alternada. Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/97984.pdf>. Último acesso em: 11/11/2018.
- [15] *Datasheet* Triac. Disponível em: <http://download.maritex.com.pl/pdfs/sc/BTA16-600B.pdf>. Último acesso em: 11/11/2018.