

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO HENRIQUE FALQUETO DIAS

**SIMULAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO AUTO-
EXCITADO POR MEIO DE CAPACITORES**

VIÇOSA
2012

PEDRO HENRIQUE FALQUETO DIAS

**SIMULAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO AUTO-
EXCITADO POR MEIO DE CAPACITORES**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Tarcízio Resende.

VIÇOSA
2012

PEDRO HENRIQUE FALQUETO DIAS

**SIMULAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO AUTO-
EXCITADO POR MEIO DE CAPACITORES**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de outubro de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Tarcísio Resende - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Msc. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Obstáculos são aqueles perigos que você vê quando tira os olhos do seu objetivo.

(Henry Ford)

Dedico esse trabalho aos meus pais Oswaldo e Léia.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por me guiar neste trabalho e em todos os outros momentos da vida.

A minha mãe, Léia, por todo incentivo dado não só durante a realização deste trabalho, mas em toda a graduação. A todos os familiares que de alguma forma me ajudaram nesta caminhada, em especial as tias Andréia e Cissa.

Ao meu orientador José Tarcísio Resende, por me passar as informações necessárias para a realização do trabalho.

A galera da República Os Gambás e a todos os agregados e amigos conquistados durante minha passagem por Viçosa.

Resumo

Este trabalho apresenta a simulação digital de um gerador de indução trifásico, auto-excitado por meio de capacitores. Para a referida simulação é utilizada uma modelagem da máquina de indução trifásica, na qual é incluída a saturação magnética, arranjada aqui para a simulação do gerador. A simulação é realizada para o gerador operando em vazio e tendo os terminais do estator e o banco de capacitores ligados em triângulo. São utilizados três bancos de capacitores para a verificação do efeito de saturação magnética a partir do momento em que o banco é aumentado. Para confrontações teórico-experimentais os gráficos de correntes obtidas da simulação são comparados com os adquiridos experimentalmente.

Abstract

This paper presents the digital simulation of a three-phases induction generator, self-excited by capacitors. For this simulation a modeling of three-phases induction machine is used, in which is included the magnetic saturation, arranged to simulate the generator. The simulation is performed for the generator at no-load operating with the stator terminals and the capacitor banks connected in delta. Three capacitor banks are used for checking the effect of magnetic saturation from the time the bank is increased. For theoretical-experimental comparison, the current charts obtained from the simulation are compared with those experimentally obtained.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Revisão Bibliográfica	14
1.2.1	Considerações Gerais	14
1.2.2	Gerador de Indução	16
1.2.2.1	Operação Interligada A Rede Elétrica	17
1.2.2.2	Operação isolada da rede elétrica	17
2	Modelagem do Gerador de Indução Trifásico	22
2.1	Considerações Gerais	22
2.2	Modelagem Matemática do Gerador de Indução	22
2.3	Introdução do Banco de Capacitores e da Carga na Modelagem matemática do gerador.....	25
2.4	Solução Numérica da Modelagem do Gerador de Indução Trifásico	27
3	Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente e das Curvas de Magnetização.....	30
3.1	Considerações Gerais	30
3.2	Determinação dos Parâmetros através do Circuito Equivalente.....	30
3.3	Curvas de magnetização	30
4	Resultados e Discussões.....	33
5	Conclusão	38
	Referências Bibliográficas	39

Lista de Figuras

Figura 1 – Máquina de indução do tipo gaiola de esquilo.....	14
Figura 2 - Circuito equivalente por fase da máquina de indução trifásica	15
Figura 3 - Gerador de indução ligado a um banco de capacitores (autoexcitação).....	18
Figura 4 - Equilíbrio do circuito magnético da máquina.....	19
Figura 5 - Circuito equivalente por fase do gerador de indução trifásica.....	19
Figura 6 – Efeitos de velocidade e capacitância sobre tensão gerada	21
Figura 7 – Distribuição especial da força magnetomotriz.....	24
Figura 8 – Gerador ligado em triângulo	25
Figura 9 – Equações Matriciais	28
Figura 10 – Esquema montado realização dos testes	31
Figura 11 – Componentes fundamental da máquina de indução.....	31
Figura 12 – Componente harmonica de terceira ordem da máquina de indução.....	32
Figura 13 – Tensão nas fases a,b e c para capacitores 25 μF	33
Figura 14 - Tensão nas fases a,b e c para capacitor de 35 μF	33
Figura 15 - Tensão nas fases a,b e c para capacitor de 45 μF	34
Figura 16 – Corrente nas Fases a,b e c para capacitores de 25 μF	34
Figura 17 - Corrente nas Fases a,b e c para capacitores de 35 μF	35
Figura 18 - Corrente nas Fases a,b e c para capacitores de 45 μF	35
Figura 19 – Formas de ondas da corrente medida e simulada na fase A com banco de capacitors de 45 μA	36
Figura 20 - Formas de ondas da corrente medida e simulada na fase A com banco de capacitors de 35 μA	36
Figura 21 - Formas de ondas da corrente medida e simulada na fase A com banco de capacitors de 45 μA	37

1 Introdução

Com a crescente demanda de energia elétrica torna-se necessário cada vez mais buscar formas alternativas de geração de energia elétrica. Dentre estas fontes geradoras de energia elétrica podem-se destacar as pequenas centrais hidrelétricas, a co-geração, a energia eólica, a biomassa, dentre outras. Todas estas fontes geradoras podem incorporar ao parque gerador uma parcela significativa de energia elétrica.

Existem também no Brasil certas regiões com grande dispersão populacional e uma baixa densidade de consumo energético. Essas localidades são constituídas de pequenos pólos de desenvolvimento como propriedades agrícolas, mineradoras, vilas, povoados, onde o fornecimento de energia torna-se imprescindível para o desenvolvimento e melhoria da qualidade de vida destas comunidades.

Para levar energia elétrica a estes locais de consumo poder-se-ia optar por construir extensas redes elétricas derivadas das subestações de grandes usinas hidrelétricas ou pela construção de pequenas centrais hidro ou termoelétricas, dependendo da disponibilidade de energia primária na região. A primeira opção, muitas vezes, é inviabilizada devido ao custo de implantação e custo operacional do projeto. Já a segunda opção é mais atrativa e tradicionalmente se utiliza o gerador síncrono.

Neste caso, poderia ser usado o gerador de indução que se destaca, para este tipo de aplicação (potência gerada até 25KW), devido às vantagens que o mesmo apresenta frente aos geradores síncronos e geradores de corrente contínua, tais como, maior simplicidade de construção, robustez, menor custo e menor necessidade de manutenção (especialmente os de rotor em gaiola de esquilo), além de permitir grandes variações de velocidade através dos inversores de frequência. Por outro lado, o gerador de indução necessita de uma fonte auxiliar capaz de fornecer a potência reativa necessária para a magnetização do seu circuito magnético. A máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo não tem acesso externo no rotor, já a de rotor bobinado é inviável quando aplicada como gerador. Outra restrição do gerador de indução é que a tensão e frequência geradas variam em função da carga e da velocidade de rotação do eixo. Entretanto, mesmo com estas restrições o gerador de indução é uma opção para fontes alternativas de geração de energia elétrica.

Investigações ao longo de várias décadas comprovaram que o uso de geradores de indução autoexcitados, com o auxílio de banco de capacitores ou outra fonte qualquer de reativo, são viáveis e benéficos como fontes alternativas de geração de energia [06]. Isto tem

motivado instituições de ensino e centros de pesquisa a procurarem, através de modelagens matemáticas e testes experimentais, alternativas que viabilizem o uso deste gerador.

Para análise teórica mais detalhada do funcionamento de um gerador de indução autoexcitado, a sua modelagem matemática deve necessariamente incluir a saturação magnética, pois o mesmo opera sempre com o seu circuito magnético saturado.

Partindo-se de uma modelagem matemática, já desenvolvida para a máquina de indução, na qual é contemplada a saturação magnética, referência [05], será estudada a operação em vazio do gerador de indução trifásico, auto-excitado por meio de capacitores.

Na simulação realizada e nos ensaios feitos optou-se que o gerador terá os terminais do estator ligados em triângulo com os bancos de capacitores ligados a ela. Para a verificação da saturação magnética serão utilizados três valores diferentes de capacitores. Pretende-se comparar os gráficos das correntes de fase obtidos na simulação com os adquiridos experimentalmente. É importante dizer que a máquina de indução trifásica quando está operando como gerador, auto-excitado por meio de capacitores, isolada da rede elétrica, sempre opera com o seu circuito magnético saturado.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do gerador de indução trifásico operando em vazio, auto-excitado por meio de capacitores. Através da simulação digital e resultados experimentais serão analisadas as distorções nas formas de onda das correntes.

1.2 Revisão Bibliográfica

1.2.1 Considerações Gerais

Para geração de energia elétrica geralmente são utilizadas as máquinas síncronas devido a grande facilidade no controle das potências ativa e reativa, da tensão e frequência. No entanto, a máquina de indução, para geração de energia elétrica em pequena quantidade torna-se vantajosa, pois a mesma é mais robusta, tem custo inferior, requer menos manutenção e possui maior relação potência/peso [07]. Ela é bastante simples, sendo formada por duas partes: estator e rotor. Enquanto a primeira constitui a parte fixa, a segunda representa a parte móvel. Separando as duas tem-se o entreferro. Por possuir uma montagem bem simples, este tipo de máquina tem baixo custo (40% em média mais barato), baixa manutenção, robustez e simplicidade de operação. Temos na figura 1 uma máquina de indução do tipo gaiola de esquilo.



Figura 1 – Máquina de indução do tipo gaiola de esquilo

Além disso, são consideradas situações operacionais para justificar sua utilização como: alta densidade de potência (W/kg), resultando em reduzido tamanho da máquina, autoproteção contra sobrecarga e curto circuitos. Por estas razões, torna-se interessante

utilizar a máquina de indução como gerador para a geração de energia elétrica em pequena quantidade, caso de comunidades isoladas.

O principal fator no funcionamento da máquina de indução é o estabelecimento do campo magnético no estator, dado pela equação 1.

$$w_s = \frac{120f_s}{p} \quad (1)$$

Em que:

w_s - velocidade síncrona em rpm

f_s - frequência síncrona

p - número de pólos magnéticos da máquina

Também, a máquina de indução, em regime permanente, pode ser representada pelo seu circuito, conforme mostrado na Figura 02.

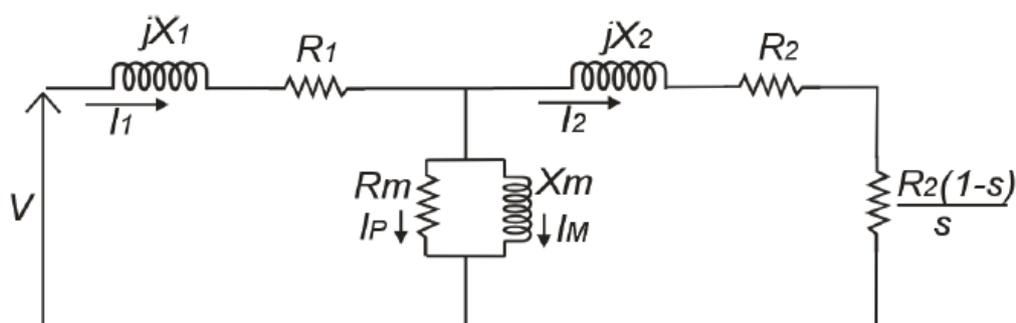


Figura 2 - Circuito equivalente por fase da máquina de indução trifásica

Em que:

V - Tensão de alimentação

I_1 - Corrente no estator

I_2 - Corrente no rotor

X_1 - Reatância de dispersão do estator

X_2 - Reatância de dispersão do rotor

X_m - Reatância de magnetização

R_1 - Resistência do estator

R_2 - Resistência do rotor

R_m - Resistência representativa das perdas no ferro

I_p - Corrente referente às perdas no ferro

I_m - Corrente de magnetização

Apesar de apresentar resultados satisfatórios, este circuito não leva em conta alguns importantes pontos, como a saturação magnética, responsável pela não linearidade do ramo de magnetização. No caso do gerador a potência mecânica recebida no seu eixo, através da máquina primária, é convertida na forma elétrica (potência ativa), através da seguinte equação:

$$Pot = \frac{R_2 (1-s)}{s} \quad (2)$$

Se o gerador estiver isolado da rede elétrica não haverá nenhuma geração de energia, pois falta a potência reativa necessária para suprir as reatâncias indutivas da máquina. Este reativo é conseguido através da colocação de um capacitor de valor apropriado, em paralelo com os terminais do estator.

1.2.2 Gerador de Indução

Como descrito anteriormente, para a máquina de indução funcionar como gerador é necessário uma fonte de potência com excitação suficiente. Esta possibilidade surge como uma solução de menor custo em situações em que o sistema possui baixa potência (abaixo de 50 KW), caso típico de comunidades isoladas. Porém, alguns problemas devem ser considerados quando se utiliza uma máquina de indução como gerador, podendo se destacar a variação de amplitude e frequência da tensão gerada. Para isso duas soluções podem ser consideradas: a conexão da máquina diretamente com a rede elétrica ou a utilização de um banco de capacitores em paralelo com os terminais do estator.

Se uma máquina de indução trifásica tem o seu eixo acionado acima de sua velocidade síncrona ela passa a funcionar como um gerador. Neste caso, a potência mecânica recebida no seu eixo, pela máquina primária, é convertida na forma de potência ativa. Já a potência reativa para a magnetização de seu circuito magnético deve ser suprida por alguma fonte de potência reativa.

Em sistemas de geração de baixa potência, mostra-se vantajosa a aplicação do gerador de indução quando comparado com os geradores síncronos, por exemplo, principalmente devido à fatores econômicos, tais como, custos reduzidos na aquisição da máquina (40% menor em média), ausência de fontes DC e praticamente ausência de manutenção [15].

1.2.2.1 Operação Interligada A Rede Elétrica

Quando ligada à rede elétrica o gerador de indução dispensa o emprego de sistemas de controle de tensão e frequência, uma vez que os mesmos ficam definidos pela rede.

Neste ponto devem ser citadas outras características importantes do gerador de indução. Primeiramente, o rendimento do gerador é sempre menor do que o da mesma máquina operando como motor. Isto ocorre pelo fato da tensão gerada internamente (tensão no entreferro) ser maior que a tensão terminal, o que acarreta em um aumento nas perdas no núcleo [6]. Estas perdas são supridas pela potência mecânica de entrada, logo a potência elétrica gerada pela máquina operando como gerador será menor que a potência nominal da mesma operando como motor.

Algumas modificações podem ser realizadas para que o rendimento do gerador aumente. Uma das modificações que pode ser feita é a diminuição do valor de resistência do rotor, por não ser necessário torque de partida, o que reduz as perdas por efeito Joule nestes enrolamentos [10].

1.2.2.2 Operação isolada da rede elétrica

Inicialmente esta possibilidade não era muito interessante e nem muito estudada. Porém, nas décadas seguintes, quando se iniciou o uso na indústria de bancos de capacitores para correção do fator de potência em motores de indução, começou a ocorrer o estranho problema de que, se por alguma contingência, a rede elétrica fosse desligada, tensões em níveis bastante elevados começavam a ser geradas. Isto gerava um grande problema, pois mesmo após desligados os motores permaneciam em rotação durante bastante tempo. Conseqüentemente, aparelhos ligados paralelamente aos motores foram queimados, a isolação dos próprios motores era rompida ou geravam correntes elevadas que danificavam seus enrolamentos, e, ainda mais grave, traziam um enorme risco às pessoas que trabalhavam na planta industrial [02].

Com estes problemas que poderiam ser gerados o estudo da ligação dos bancos de capacitores aos terminais da máquina em operação isolada passou a ter importância e a ser estudado, trazendo resultados em pouco tempo, com a descoberta do método de autoexcitação dos geradores de indução através de capacitores. Nesta situação a corrente de magnetização é

fornecida por um banco de capacitores conectados aos seus terminais. A Figura 3 ilustra o gerador de indução ligado a um banco de capacitores (autoexcitação).

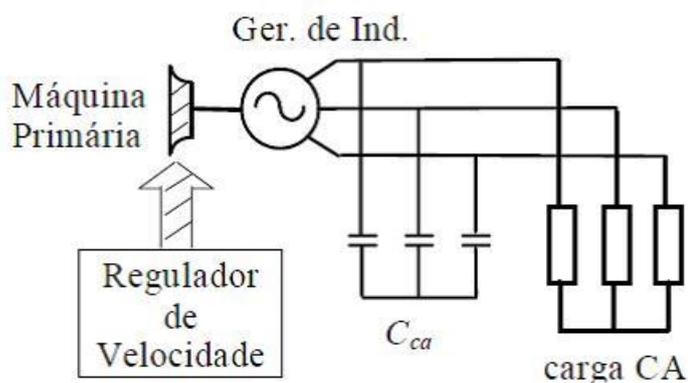


Figura 3 - Gerador de indução ligado a um banco de capacitores (autoexcitação)

O processo de autoexcitação, que tem seu transitório denominado de escorvamento sofre influencia de três fatores: a velocidade com que o gerador está sendo acionado, o valor dos capacitores e a carga. Vale lembrar que o processo de autoexcitação só é possível caso a máquina tenha um magnetismo residual. Com este magnetismo e girando a máquina a uma velocidade determinada será induzida uma tensão alternada, que faz com que circule pelos enrolamentos do estator uma corrente reativa. Esta corrente gera um fluxo de reação de armadura que é acrescentado ao magnetismo residual inicial [02]. Este aumento do fluxo faz com que a tensão induzida aumente e então entramos em um processo cíclico que continua até o momento em que a reta referente à reatância capacitiva intercepta a curva de magnetização da máquina, atingindo o equilíbrio do circuito magnético da máquina. Na Figura 4 temos ilustrado o equilíbrio referido anteriormente.

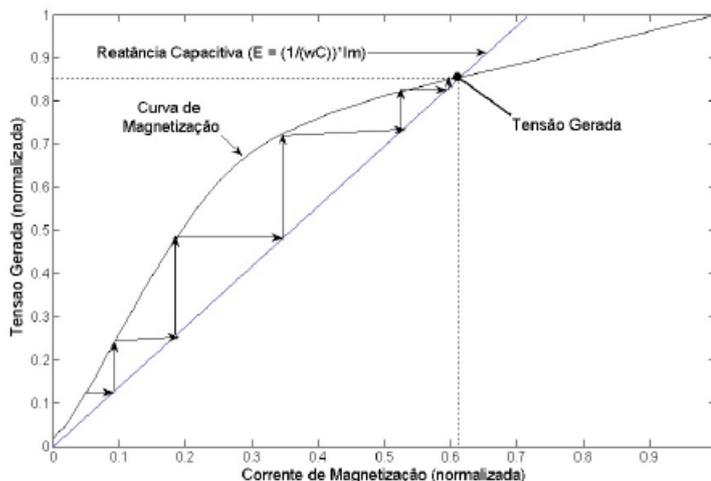


Figura 4 - Equilíbrio do circuito magnético da máquina

Pela Figura 4 se pode perceber que para que o equilíbrio seja atingido, a máquina de indução deve operar na região de saturação da curva de magnetização, o que faz com que os cálculos que analisam o desempenho do gerador de indução isolado sejam mais complexos. Uma das técnicas que é usada para inserir este elemento não linear na modelagem do gerador de indução é a utilização do circuito equivalente da máquina de indução acrescido de um bipolo não linear, que tem função de representar a curva de magnetização em vez da reatância linear. O novo circuito equivalente é mostrado na Figura 5. Vale lembrar que este circuito equivalente serve apenas para o permanente da máquina, não podendo representar então o efeito de escorvamento.

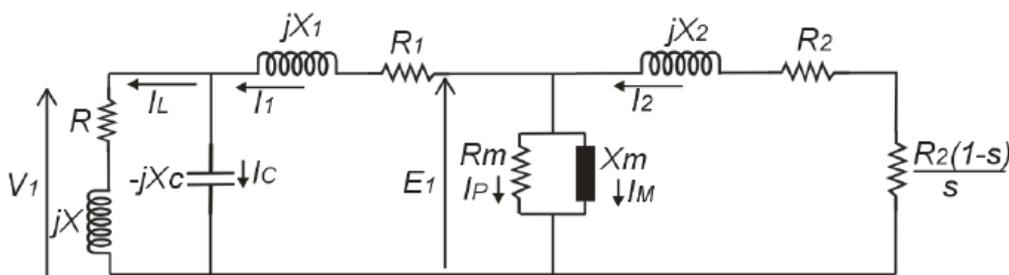


Figura 5 - Circuito equivalente por fase do gerador de indução trifásica

Em que:

V_1 – Tensão terminal gerada

R – Resistência da carga

X – Reatância da carga

X_c – Reatância do banco de capacitores responsáveis pela autoexcitação

I_L – Corrente na carga

I_c – Corrente no banco de capacitores responsáveis pela autoexcitação

A partir do circuito equivalente apresentado acima uma análise qualitativa pode ser realizada. Do circuito equivalente é possível demonstrar que o gerador de indução fornece uma tensão estável quando a reatância capacitiva é aproximadamente igual à reatância de magnetização da máquina. Considerando o equilíbrio da potencia reativa:

$$Q_c = Q_L \quad (3)$$

$$\frac{V_1^2}{X_c} = \frac{E_1^2}{X_M} + I_1^2 X_1 + I_2^2 X_2 \quad (4)$$

Supondo o gerador em vazio, temos o escorregamento assumindo valores muito próximos à zero, podendo então ser considerada a parte relativa ao rotor com impedância infinita.

Como a queda de tensão referente ao estator é muito pequena ela é desprezada e então E_1 vale aproximadamente V_1 . Assim a equação pode ser simplificada, assumindo a seguinte forma:

$$X_c = X_M \quad (5)$$

Sendo $X_c = \frac{1}{\omega_s C}$

Em que ω_s e a frequência angular síncrona.

Pela última relação mostrada se observa que a tensão fornecida pelo gerador depende, e muito, do qual capacitor é utilizado. Com valores maiores para o capacitor tem-se uma menor inclinação da reta, fazendo com a intercepção com a curva de magnetização seja em valores altos de tensão. Caso o valor do capacitor seja muito alto, teremos uma situação crítica, pois a reta irá se sobrepor a região da curva de magnetização, tornando possível vários valores de tensão, causando assim total instabilidade.

Entretanto, quando se tiver valores mais baixos para os capacitores, as retas terão maior inclinação e a intercepção com a curva de magnetização se dará em menores valores de tensão. Caso estes valores sejam muito baixos, a intercepção ocorrerá em regiões em que existe praticamente apenas fluxo residual, impedindo assim o processo de escorvamento.

Outro fator que interfere na tensão fornecida pelo gerador é a velocidade, ou seja, caso ocorram variações na rotação do eixo, a tensão gerada será alterada assim como a frequência. No caso de uma redução da velocidade, a curva de magnetização se desloca para baixo. Caso haja aumento no aumento da velocidade, a curva de magnetização se desloca para cima.

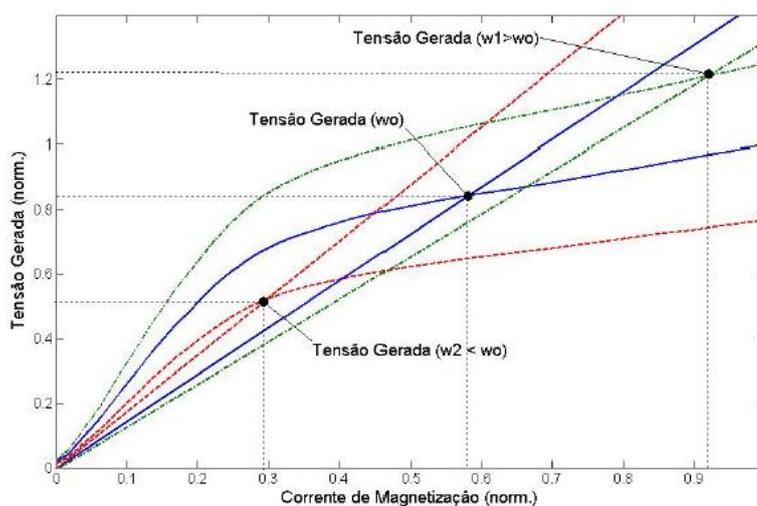


Figura 6 – Efeitos de velocidade e capacitância sobre tensão gerada

Apesar de todos estes aspectos positivos, muitas vezes este tipo de gerador e qualquer outro dispositivo magnético é obrigado a trabalhar na região de saturação magnética, tendo como objetivo a obtenção de uma boa relação custo-benefício em seu projeto de construção. Esta saturação traz comumente dois efeitos que devem ser considerados durante o estudo realizado, alterações no valor eficaz e distorções harmônicas em sua forma de onda, sendo ambos na tensão ou corrente. Para o tipo de funcionamento da máquina de indução nesta situação, a principal consequência a ser considerada devido aos efeitos gerados pela saturação magnética é a não linearidade presente, que terá alto grau de importância, pois a modelagem do motor e conseqüentemente do gerador de indução sofre algumas mudanças. Sendo assim, esses efeitos serão observados durante este trabalho.

2 Modelagem do Gerador de Indução Trifásico

2.1 Considerações Gerais

A modelagem utilizada neste trabalho foi desenvolvida por [5] e durante todo seu desenvolvimento é considerada a saturação magnética, o que é extremamente importante, pois esta característica faz com que o circuito magnético assuma uma não linearidade física. Sendo assim, para se obter o concatenamento de fluxo magnetizante de cada fase o princípio da superposição não pode ser utilizado, ou seja, não se pode obter separadamente as distribuições de f.m.m das fases as respectivas distribuições de densidade de fluxo magnético.

Além disso, diferentemente da maioria das outras modelagens, todo o equacionamento é desenvolvido no domínio do tempo, permitindo a simulação do comportamento dinâmico do gerador, e em variáveis abc, o que é importante para que não seja perdido o entendimento físico das equações envolvidas. É importante dizer que a modelagem de uma máquina pode ser desenvolvida de diversas formas e entre elas o modelo em variáveis abc, que é um modelo em que a máquina é tratada fisicamente do início ao fim da modelagem, sem haver transformação de variáveis como, por exemplo, as variáveis “dqo”.

2.2 Modelagem Matemática do Gerador de Indução

Para a realização da modelagem matemática do gerador de indução trifásico, se faz necessário a realização da modelagem da máquina de indução trifásica. A partir daí considerações serão feitas e o gerador de indução trifásico será modelado [05].

Considerando i uma fase genérica do estator ou do rotor, sua tensão de fase é dada por:

$$v_i = R_i i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (6)$$

Em que:

I_i – corrente na fase “i”

λ_i – concatenamento de fluxo na fase “i”

R_i – resistencia na fase “i”

Em que i são as fases “abc” do estator e ABC do rotor.

O concatenamento representado por λ_i é dividido nas parcelas magnetizante e de dispersão, logo:

$$\lambda_i = \lambda d_i + \lambda m_i \quad (7)$$

Sendo λd_i e λm_i , as parcelas de dispersão e magnetizante, respectivamente. Considerando a não existência de saturação na parcela correspondente a dispersão, temos então que:

$$\lambda_i = L_i i_i + \lambda m_i \quad (8)$$

Onde:

L_i – indutância de dispersão dos enrolamentos da fase

Sabendo-se os valores de L_i , R_i e v_i , falta apenas o conhecimento da parcela magnetizante do fluxo para que a equação 08 seja equacionada. Esta parcela pode ser calculada através do conhecimento do circuito magnético, que nesta modelagem é proporcionada pelas funções harmônicas magnéticas. Estes cálculos foram realizados por [5] e foram feitos assumindo-se apenas a componente fundamental da resultante da distribuição espacial da força magnetomotriz produzida pelas correntes em todos os enrolamentos do estator e do rotor. Com esta consideração, tomando como referência angular o eixo da fase a do estator e admitindo uma sequência de fases abc, em um determinado instante o valor máximo da resultante da força magnetomotriz se encontra em uma posição angular genérica, definida pelo ângulo α . Essa configuração é mostrada na figura 7 [5].

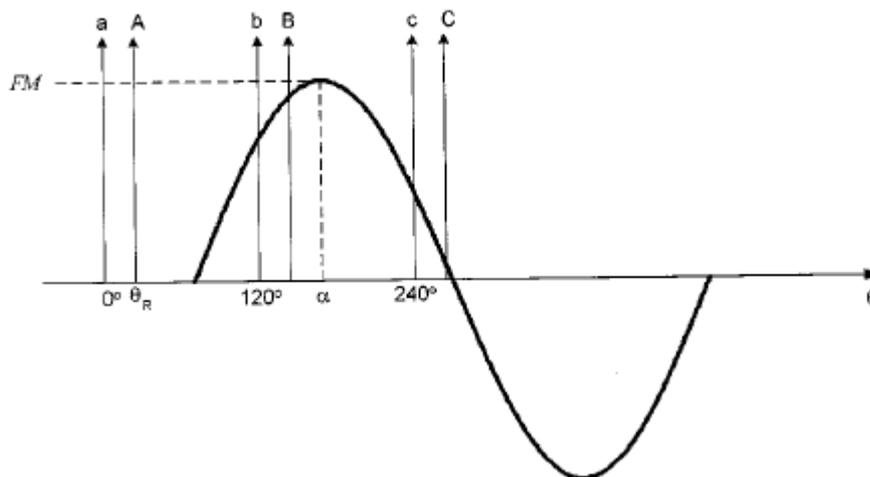


Figura 7 – Distribuição especial da força magnetomotriz

Pela figura, se pode obter a seguinte equação:

$$fmm(\theta) = FM \cos(\theta - \alpha) \tag{9}$$

Sendo:

FM - valor de pico da distribuição da força magnetomotriz

fmm - valor da força magnetomotriz em uma determinada posição angular θ .

Como somente é considerada a componente fundamental, a equação anterior assume a seguinte forma:

$$fmm(\theta) = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} 2K_i i_i \cos(\theta - \alpha) \tag{10}$$

Em que:

K_i - fatores de enrolamento das fases do rotor e do estator respectivamente

Seguindo com o desenvolvimento, o fluxo magnetizante pode ser computado através de [5]:

$$\lambda m_i = \sum_n F_h(FM) \cos[h(\theta - \alpha)] \tag{11}$$

Sendo:

FM o valor máximo de cada componente harmônica do fluxo magnetizante de fase.

F_h (FM) a função harmônica magnética.

2.3 Introdução do Banco de Capacitores e da Carga na Modelagem matemática do gerador

Conhecendo as equações da modelagem da máquina de indução trifásica, algumas novas análises devem ser realizadas e assim é possível desenvolver as equações de modelagem do gerador de indução trifásico. O trabalho realizará a modelagem com o gerador ligado em triângulo, como mostrado na Figura 8:

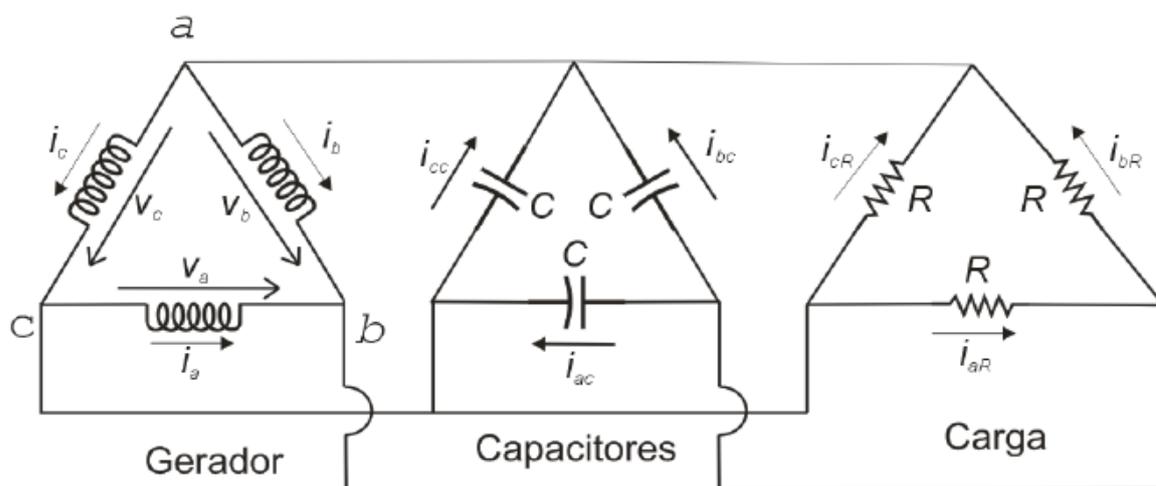


Figura 8 – Gerador ligado em triângulo

Pela figura e considerando-se a lei dos nós nos pontos a e b e sobre a carga, se tem que:

$$-i_a + i_b - i_{ac} + i_{bc} - i_{aR} + i_{bR} = 0 \tag{12}$$

$$i_a - i_c + i_{ac} - i_{cc} + i_{aR} - i_{cR} = 0 \tag{13}$$

$$i_{aR} + i_{bR} + i_{cR} = 0 \quad (14)$$

Combinando-se as equações anteriores é possível então isolar a corrente no resistor correspondente a cada fase. As equações 15,16 e 17 mostram o resultado obtido:

$$i_{aR} = \frac{1}{3} (-2i_a + i_b + i_c - 2i_{ac} + i_{bc} + i_{cc}) \quad (15)$$

$$i_{bR} = \frac{1}{3} (i_a - 2i_b + i_c + i_{ac} - 2i_{bc} + i_{cc}) \quad (16)$$

$$i_{cR} = \frac{1}{3} (i_a + i_b - 2i_c + i_{ac} + i_{bc} - 2i_{cc}) \quad (17)$$

Aplicando a lei de Ohm sobre a carga nas três fases, os valores da tensão são:

$$v_{aR} = R_L i_{aR} \quad (18)$$

$$v_{bR} = R_L i_{bR} \quad (19)$$

$$v_{cR} = R_L i_{cR} \quad (20)$$

Substituindo (15), (16) e (17) em (18), (19) e (20) se obteve:

$$v_{aR} = \frac{R_L}{3} (-2i_a + i_b + i_c - 2i_{ac} + i_{bc} + i_{cc}) \quad (21)$$

$$v_{bR} = \frac{R_L}{3} (i_a - 2i_b + i_c + i_{ac} - 2i_{bc} + i_{cc}) \quad (22)$$

$$v_{cR} = \frac{R_L}{3} (i_a + i_b - 2i_c + i_{ac} + i_{bc} - 2i_{cc}) \quad (23)$$

Analisando-se o banco de capacitores, tem-se:

$$i_{ac} + i_{bc} + i_{cc} = 0 \quad (24)$$

Sabe-se que as correntes nos capacitores são dadas por:

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (25)$$

Logo, as correntes nos capacitores por fase são:

$$i_{ac} = C \frac{dv_a}{dt} \quad (26)$$

$$i_{bc} = C \frac{dv_b}{dt} \quad (27)$$

$$i_{cc} = C \frac{dv_c}{dt} \quad (28)$$

Pela modelagem realizada para a máquina de indução, sabemos que:

$$i_a = \frac{\lambda_a - \lambda m_a}{L_s} \quad (29)$$

$$i_b = \frac{\lambda_b - \lambda m_b}{L_s} \quad (30)$$

$$i_c = \frac{\lambda_c - \lambda m_c}{L_s} \quad (31)$$

Combinando as equações (26), (27) e (28) com (29), (30) e (31), se chegam as seguintes equações:

$$\frac{dv_a}{dt} = -\frac{v_a}{R_L C} - \frac{2\lambda_a}{3L_s C} + \frac{\lambda_b}{3L_s C} + \frac{\lambda_c}{3L_s C} + \frac{2\lambda m_a}{3L_s C} - \frac{\lambda m_b}{3L_s C} - \frac{\lambda m_c}{3L_s C} \quad (32)$$

$$\frac{dv_b}{dt} = -\frac{v_b}{R_L C} + \frac{\lambda_a}{3L_s C} - \frac{2\lambda_b}{3L_s C} + \frac{\lambda_c}{3L_s C} - \frac{\lambda m_a}{3L_s C} + \frac{2\lambda m_b}{3L_s C} - \frac{\lambda m_c}{3L_s C} \quad (33)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{v_c}{R_L C} + \frac{\lambda_a}{3L_s C} + \frac{\lambda_b}{3L_s C} - \frac{2\lambda_c}{3L_s C} - \frac{\lambda m_a}{3L_s C} - \frac{\lambda m_b}{3L_s C} + \frac{2\lambda m_c}{3L_s C} \quad (34)$$

2.4 Solução Numérica da Modelagem do Gerador de Indução Trifásico

Para a solução numérica da modelagem do gerador de indução foram feitas algumas adaptações às rotinas criadas por [02], já que neste trabalho não são consideradas situações em que gerador atua com carga desacoplada. No entanto, como na modelagem não estão incluídas as perdas no circuito magnético, as mesmas se fazem presentes aqui pela carga. Vale lembrar que estas rotinas seguem a estratégia de solução sugerida por [5].

São utilizadas também algumas funções já presentes no próprio MATLAB e as equações desenvolvidas durante a modelagem do gerador de indução. Para a integração numérica o método de Runge-Kutta de 4ª ordem foi considerado. Este método necessita que as equações consideradas sejam dispostas em forma matricial como mostrada abaixo:

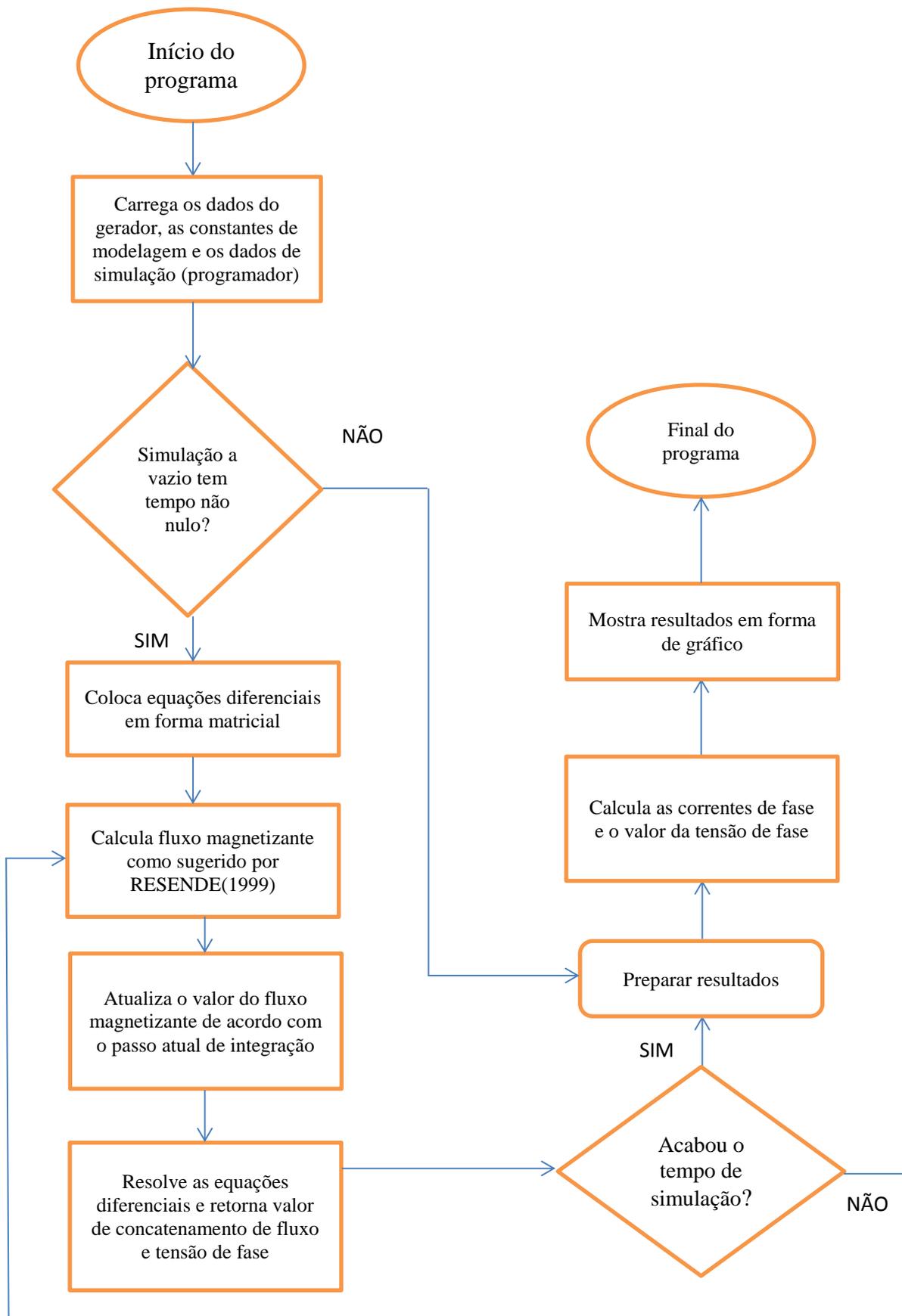
$$\dot{Y} = A \cdot Y + B \tag{35}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_a \\ \dot{\lambda}_b \\ \dot{\lambda}_c \\ \dot{\lambda}_A \\ \dot{\lambda}_B \\ \dot{\lambda}_C \\ \dot{v}_a \\ \dot{v}_b \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{L_s C} & -\frac{1}{L_s C} & -\frac{1}{L_s C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{L_s C} & \frac{2}{L_s C} & -\frac{1}{L_s C} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} & 0 \\ -\frac{1}{L_s C} & -\frac{1}{L_s C} & \frac{2}{L_s C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \\ v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} \cdot \lambda m_a \\ -\frac{R_s}{L_s} \cdot \lambda m_b \\ -\frac{R_s}{L_s} \cdot \lambda m_c \\ -\frac{R_r}{L_r} \cdot \lambda m_A \\ -\frac{R_r}{L_r} \cdot \lambda m_B \\ -\frac{R_r}{L_r} \cdot \lambda m_C \\ \frac{2}{CL_s} \cdot \lambda m_a - \frac{1}{CL_s} (\lambda m_b + \lambda m_c) \\ \frac{2}{CL_s} \cdot \lambda m_b - \frac{1}{CL_s} (\lambda m_a + \lambda m_c) \\ \frac{2}{CL_s} \cdot \lambda m_c - \frac{1}{CL_s} (\lambda m_a + \lambda m_b) \end{bmatrix}$$

Figura 9 – Equações Matriciais

A figura 9 mostra as Equações matriciais utilizadas na solução numérica da modelagem. Note que a matriz A é a responsável por relacionar as variáveis de estado com suas derivadas, enquanto a matriz B possuem termos que não possuem ligação direta. Como neste trabalho o gerador só irá operar em vazio, as perdas no cobre, no ferro e as perdas devido a corrente de fuga no capacitor são as únicas perdas elétricas consideradas. Quando em vazio, R representa apenas as perdas no núcleo magnético e nos capacitores.

A seguir é apresentado o fluxograma que mostra como funciona o algoritmo responsável pela solução numérica da modelagem.



3 Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente e das Curvas de Magnetização

3.1 Considerações Gerais

Os parâmetros da máquina de indução e as suas características magnéticas são obtidas com a utilização da máquina de indução trifásica disponível no Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFV, como o rotor bobinado, 2,2KW, 1690 rpm, 60 Hz, Δ -Y – 220/380 V – 9,0/5,2 A e fator de potência de 0,8.

3.2 Determinação dos Parâmetros através do Circuito Equivalente

Os parâmetros do circuito equivalente, necessários para a simulação do gerador, foram determinados através dos testes convencionais, os ensaios em vazio e de rotor bloqueado e medição de resistência do estator.

Através destes ensaios, realizados por [02] na mesma máquina, e possuindo o circuito equivalente da máquina de indução, se obteve os seguintes valores para os parâmetros da máquina de indução que está sendo utilizada.

- $R_s = 3,32 \Omega$

- $R_r = 4,82 \Omega$

- $R_p = 932,3 \Omega$

- $L_s = 16,6 \text{ mH}$

- $L_r = 16,6 \text{ mH}$

3.3 Curvas de magnetização

As curvas de magnetização utilizadas neste trabalho são as encontradas por [02]. Temos na Figura 10 o esquema montado para os testes realizados. Através destes testes se mediu corrente e tensão sobre uma fase, sendo estes valores mostrados no osciloscópio e transferidos posteriormente a um computador.

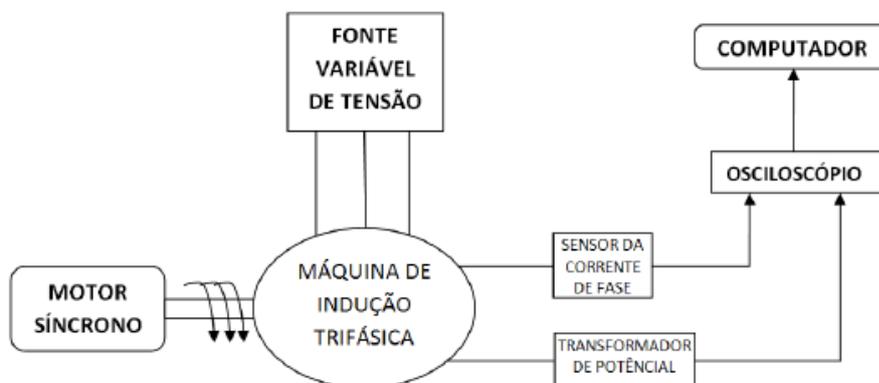


Figura 10 – Esquema montado realização dos testes

Feito isso as curvas de magnetização obtidas para o harmônico fundamental e para o terceiro harmônico são mostradas nas Figuras 11 e 12 abaixo.

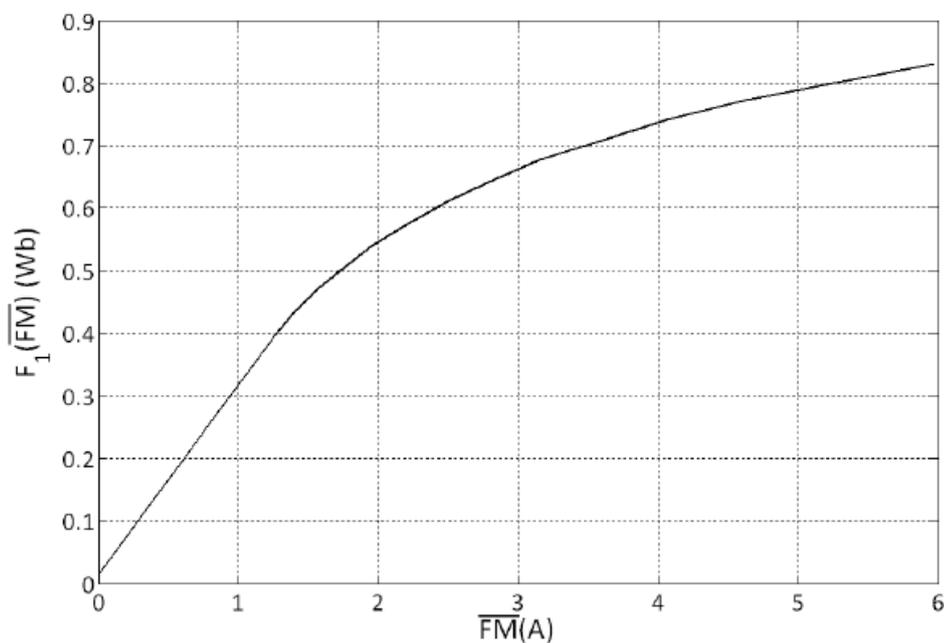


Figura 11 – Componentes fundamental da máquina de indução

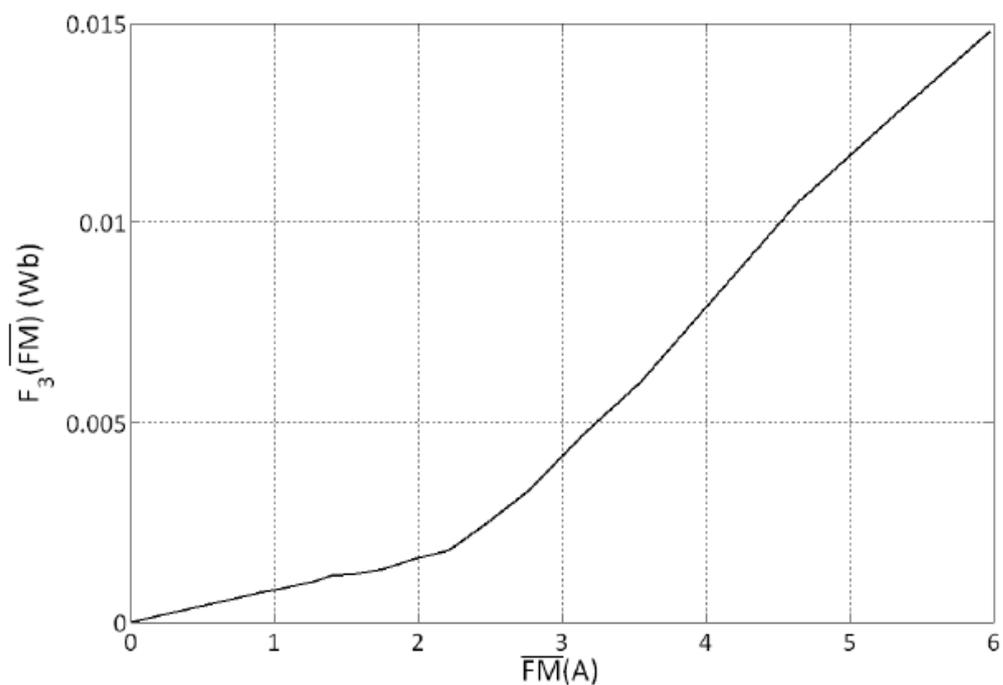


Figura 12 – Componente harmônica de terceira ordem da máquina de indução

Observando-se as Figuras 11 e 12, vimos que a região de saturação nesta máquina é alcançada antes que a máquina estudada por [5]. Provavelmente isto ocorre devido às características construtivas da máquina. Além disso, para a máquina ensaiada em [5] tensões perfeitamente senoidais foram utilizadas, o que não aconteceu com a máquina estudada neste trabalho.

4 Resultados e Discussões

A simulação do gerador foi feita ligando os terminais do estator e o banco de capacitores em triângulo. Para melhor verificação do efeito de saturação magnética foram utilizados três bancos de capacitores, de $25\mu\text{F}$, $35\mu\text{F}$ e $45\mu\text{F}$ por fase. À medida que o banco é aumentado o efeito da saturação magnética torna-se mais evidente, porque o ponto de operação do gerador se situa na região mais saturada da sua curva normal de magnetização.

As Figuras 13,14 e 15 mostram, respectivamente, as formas de onda das tensões para os capacitores de $25\mu\text{F}$, $35\mu\text{F}$ e $45\mu\text{F}$, obtidas da simulação.

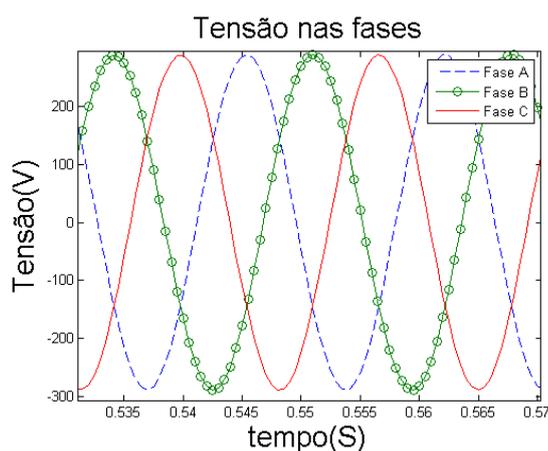


Figura 13 – Tensão nas fases a,b e c para capacitores $25\mu\text{F}$

Com capacitores de $25\mu\text{F}$ observou-se que as tensões nas fases a,b e c giram em torno de 250 V.

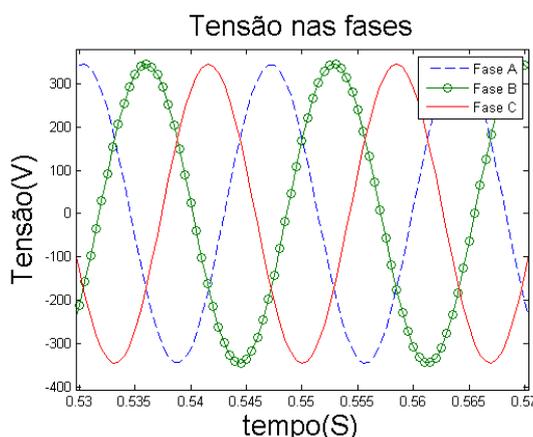


Figura 14 - Tensão nas fases a,b e c para capacitor de $35\mu\text{F}$

Quando ligados capacitores de $35 \mu\text{F}$ o que se pode observar foram tensões atingindo um valor perto de 300 V .

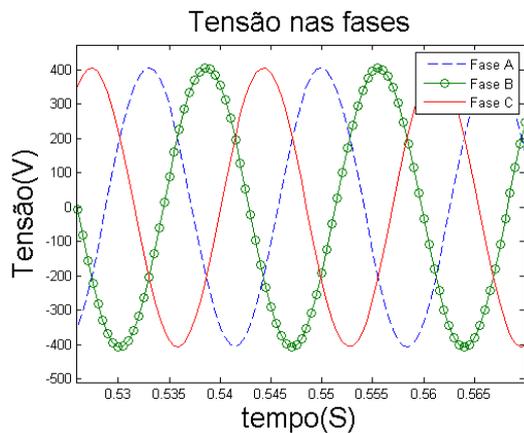


Figura 15 - Tensão nas fases a,b e c para capacitor de $45 \mu\text{F}$

A Figura 15 mostra o valor das tensões nas fases quando os terminais do estator são ligados a capacitores de $45 \mu\text{F}$. São observadas tensões de pouco mais de 400 V para esta situação.

As Figuras 16,17 e 18 mostram as formas de onda das correntes de fase para os capacitores de $25 \mu\text{F}$, $35 \mu\text{F}$ e $45 \mu\text{F}$, respectivamente.

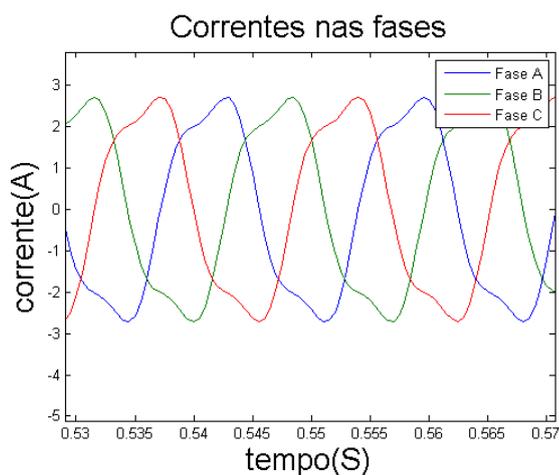


Figura 16 – Corrente nas Fases a,b e c para capacitores de $25 \mu\text{F}$

Pela Figura 16 observa-se que a corrente se distorce um pouco nas três fases quando são conectados capacitores de $25 \mu\text{F}$ e que tem pico entre 2,5 e 3 A.

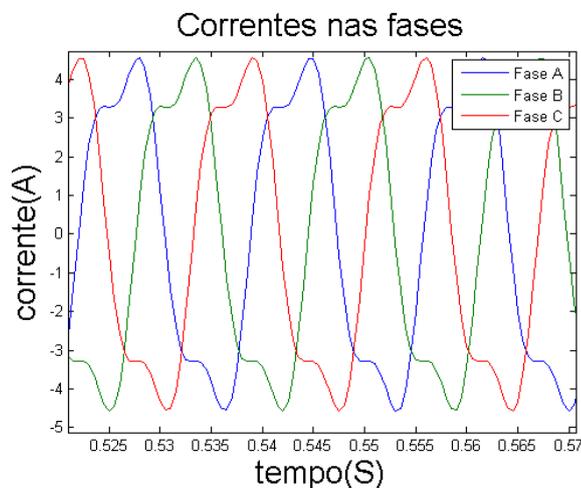


Figura 17 - Corrente nas Fases a,b e c para capacitores de $35 \mu\text{F}$

Na Figura 17 temos o valor de corrente atingindo quase 4,5 A quando capacitores conectados são $35 \mu\text{F}$.

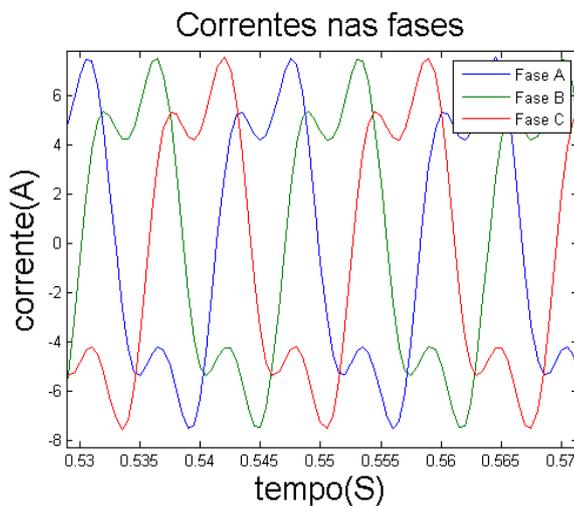


Figura 18 - Corrente nas Fases a,b e c para capacitores de $45 \mu\text{F}$

Quando são conectados capacitores de $45 \mu\text{F}$, a corrente atinge seu valor máximo considerando-se as três situações, atingindo valores acima de 6 A.

Observa-se das figuras anteriores que as formas de onda das tensões são senoidais enquanto as da corrente são distorcidas, sendo esta distorção maior à medida que o banco de capacitores é aumentado, pois assim o gerador opera mais na região de saturação. Caso o gerador tivesse os seus terminais do estator ligados em estrela, seriam as tensões de fase que

teriam suas formas de onda distorcidas e as correntes teriam formas de onda senoidais, acontecendo o contrário.

Para fins de comparação dos resultados de simulação com os obtidos experimentalmente a forma de onda das correntes da fase A são mostradas nas Figuras 19,20 e 21 para cada banco de capacitores.

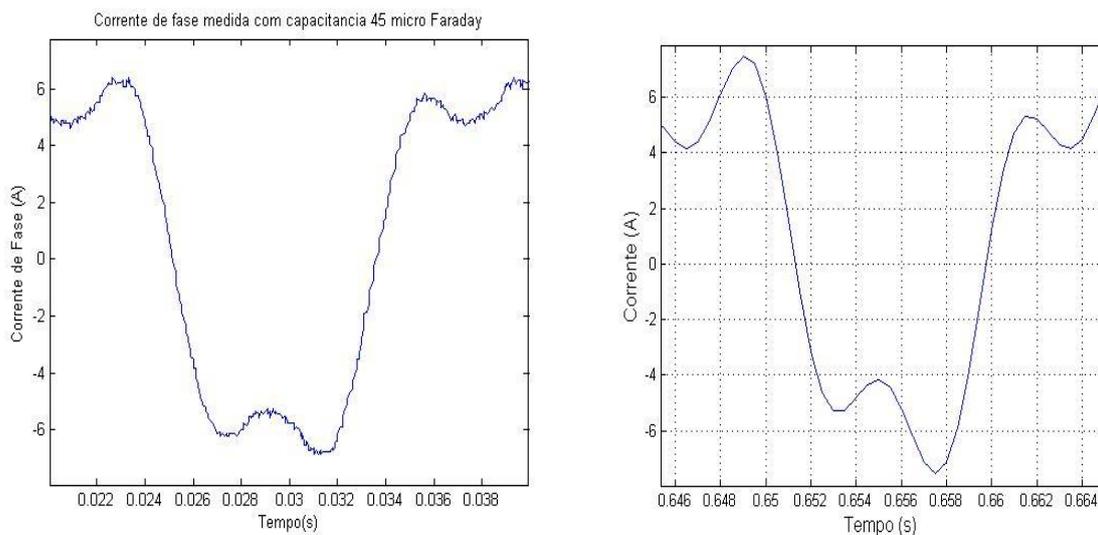


Figura 19 – Formas de ondas da corrente medida e simulada na fase A com banco de capacitores de 45 μ A

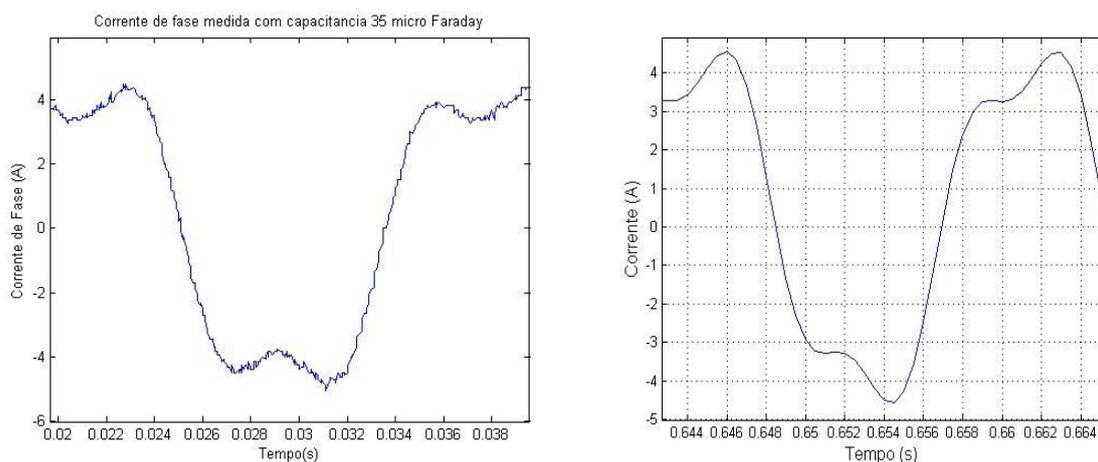


Figura 20 - Formas de ondas da corrente medida e simulada na fase A com banco de capacitores de 35 μ A

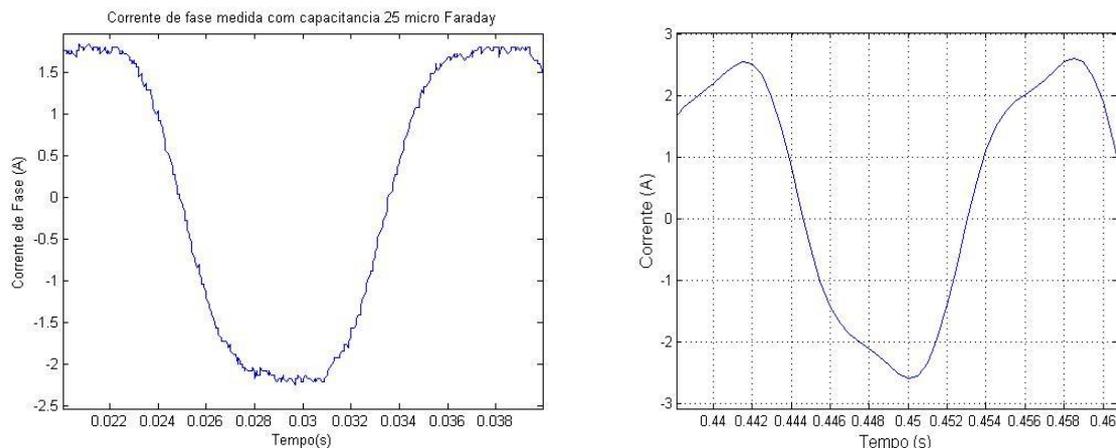


Figura 21 - Formas de ondas da corrente medida e simulada na fase A com banco de capacitores de 45 μ A

Observa-se claramente a partir das formas de onda das correntes de fase das figuras anteriores que à medida que os capacitores são aumentados a distorção da corrente aumenta. Isto ocorre, pois a velocidade é mantida constante em todas as situações, e o aumento no valor dos bancos de capacitores faz com que ocorra um aumento na tensão gerada e conseqüentemente maior distorção harmônica, gerada pela grande predominância do terceiro harmônico. Quando os capacitores conectados possuíam valor de 25 μ F, a percentagem de terceiro harmônico da corrente de fase simulada é 17,46%. Para capacitores de 35 μ F esta percentagem aumenta assumindo o valor 22,35%. Com capacitores de 45 μ F, a percentagem do terceiro harmônico assumiu o maior valor dentre as situações testadas, valendo 34,50%. Esta distorção pode ser prejudicial quando se avalia o desempenho da máquina, pois valores eficazes da corrente de fase mudam. Nota-se claramente que quanto maior o valor do banco de capacitores presentes, maior será a contribuição do 3º harmônico, o que gera uma maior distorção nas formas de onda.

5 Conclusão

O estudo realizado sobre o gerador de indução trifásico tem importância nos dias de hoje, já que novas formas de geração de energia são necessárias, pois a demanda vem subindo consideravelmente nas últimas décadas. Observa-se que a simulação digital foi validada, uma vez que os confrontamentos teóricos experimentais atingiram excelentes níveis.

Foi possível analisar as distorções que ocorrem nas formas de onda das correntes. Com o aumento dos valores dos bancos de capacitores os efeitos da saturação magnética ficaram mais evidentes, ou seja, as distorções nas formas de onda das correntes aumentaram. Isto ocorre, pois o gerador passa a operar com mais intensidade na região de saturação. Logo, é importante que qualquer modelagem realizada para o gerador de indução contemple a saturação magnética, já que o mesmo sempre atua nesta região.

Para futuros trabalhos é interessante realizar, por exemplo, a ligação em estrela dos bancos de capacitores e dos terminais do estator. Além disso, podem ser estudadas diferentes técnicas para controle do reativo sem ser a auto-excitação por meio de capacitores.

Referências Bibliográficas

- [01] MOREIRA, J. C.; Modeling of Saturation a.c Machines Including Air Gap Flux Harmonic Components, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, N.º2, p. 343 - 349, March/April, 1992.
- [02] PINHEIROS, D. G.; Modelagem matemática do Gerador de Indução Trifásico, incluindo a Saturação Magnética, Viçosa, 2007
- [03] LIAO, Y.; LIPO, T. A.; Effect of Saturation third Harmonic on the Performance of Squirrel-Cage Induction Machines, Electric Machines and Power Systems, Vol. 22, N.º2, p. 155 - 171, March/April 1994.
- [04] NETO, LUCIANO M.; RESENDE, JOSÉ, T.; Uma Análise da Saturação Magnética em uma Máquina de Indução Trifásica através dos seus Terminais Elétricos, XII CBA, Uberlândia, 6 p., 1998.
- [05] RESENDE, J. T.; Modelagem da Máquina de Indução Trifásica, Incluindo a Saturação Magnética - Análise Dinâmica do Gerador de Indução Auto-Excitado, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Minas Gerais, 1999, 150p. p. 18-50.
- [06] RESENDE, J. T.; Operação Isolada e Interligada do Gerador de Indução, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI Minas Gerais, 1994, 96p.
- [07] JUNIOR, S. C.; CALDAS, F. P.; Utilização do Gerador de Indução em Usinas Hidroelétricas de Pequeno Porte, Balneário Camboriú - UFSC, VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica p. 1-18, 1981
- [08] Shapman, J. S. Electric Machinery Fundamentals 4th edition, Mc GrawHill (2005), pg. 381, 382
- [09] FITZGERALD, A.E; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A. Máquinas Elétricas: Conversão Eletromecânica de Energias, Processos, Dispositivos e Sistemas. McGraw- Hil do Brasil - 1975
- [10] MARTINS, F.N.; Controle do Gerador de Indução Trifásico Baseado em Lógica Fuzzy, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, 138p, 2003
- [11] FAIZ, J. et al. Design of a Three-phase Self-Excited Induction Generator. IEEE Transactions on Energy Conversion. v.10, n.3, Sep. 1995.
- [12] WAGNER, C. F.. Self-Excitation of Induction Motors. AIEE Transactions, v.58, p. 47-51, Feb. 1939.
- [13] CALDAS, Fernando Pinto. Um Estudo do Gerador de Indução Auto-Excitado e Aplicações, Rio de Janeiro, 1980. 206f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro
- [14] HAYT, William H. Jr.. Eletromagnetismo. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,1983.
- [15] MEDEIROS, D. M.; VIANA, A. N. C.; REZEK, Â. J. J., 2005, "Estudo de geradores de indução na geração de energia elétrica em microcentrais hidrelétricas"- Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI