

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

BERNARDO ANTONIO TAVARES GOMES

**ESTUDO DA TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
AUTOEXCITADO, REGULANDO TENSÃO COM CAPACITORES EM
SÉRIE**

VIÇOSA
2015

BERNARDO ANTONIO TAVARES GOMES

**ESTUDO DA TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO
AUTOEXCITADO, REGULANDO TENSÃO COM CAPACITORES EM
SÉRIE**

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 Tarcísio de Resende.

VIÇOSA
2015

BERNARDO ANTONIO TAVARES GOMES

**ESTUDO DA TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
AUTOEXCITADO, REGULANDO TENSÃO COM CAPACITORES EM
SÉRIE**

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 6 de julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

Eng. Adriano da Silva Antônio - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Eng. Vinicius Gadioli da Silva - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.”

Winston Churchill

“Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que renunciar para conseguir.”

Dalai Lama

Aos meus pais e minha família, por todo amor, carinho e dedicação.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Bernardino José Gomes e Lilda Monica Alves Tavares Gomes por todo o carinho, pelo apoio nos momentos difíceis e pela alegria compartilhada nos momentos felizes. Por serem exemplos de vida para mim, e tenho grande admiração.

Agradeço também ao meu irmão Breno e minha irmã Brenda, pelo companheirismo, bons momentos de nossa história até hoje, por todo os verões que sempre passamos juntos, por nossa amizade.

A Aline por sempre me amar, dar apoio em minhas decisões e por poder contar com ela em horas difíceis.

Aos amigos das Repúblicas por onde passei em especial a Samuel e Breno, que dividiram comigo, boas história e experiências de vida e sempre me ajudaram.

Aos demais amigos da Engenharia Elétrica e de Viçosa também pelos momentos que serão lembrados por mim.

Aos professores José Tarcísio de Resende, o qual tive o privilégio de desenvolver este trabalho, vindo a enriquecer meu conhecimento sobre máquinas elétricas.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa que acrescentaram conhecimento a minha vida.

Agradeço ao Prof. Delly Oliveira Filho pela oportunidade de estágio. Ao Adriano, que junto com o Professor Delly me orientou durante meu estágio, onde recebi um grande aprendizado. E agradeço ao Vinicius por participar da banca examinadora deste trabalho.

Agradeço também a qualquer leitor que venha a se interessar por este trabalho.

E por último, porém não menos importante, agradeço a Deus por mais esta conquista, por me ajudar nas horas mais difíceis me propiciar momentos de imensa felicidade.

Resumo

Esta monografia estuda a tensão gerada por um gerador de indução trifásico autoexcitado, por meio de capacitores, quando a carga varia. A tensão é ajustada pela adição de capacitores em série com a carga na medida que esta varia.

Para isto é implementado um modelo desenvolvido para a máquina de indução trifásica, na qual é incluída a saturação magnética. Esta modelagem pode ser usada para simular em computador a máquina de indução, operando como motor e como gerador, isolado e interligado na rede elétrica.

Neste trabalho, esta modelagem é adaptada para simular em computador um gerador de indução isolado da rede elétrica, onde a regulação da tensão gerada, quando a carga varia, é controlada pela conexão de capacitores em série com a carga.

Abstract

This work is a study about the generated voltage in an auto-excited three-phase induction generator. For that it is used capacitors, when load ranges. The voltage is changed putting capacitors series with the load, as load ranges.

To have it done it is build a model developed for the three-phase induction machine, which includes the magnetic saturation. That model can be used to simulate the induction machine on softwares, operating as motor and generator, alone or connected to the electric grids.

So, in this work, the modelling is adapted to simule a induction generator apart from the electric grid, where the regulation of the generated voltage is regulate, when charges varies.

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Máquina de Indução	16
1.1.1	Introdução.....	16
1.2	Gerador de Indução Trifásico	18
1.2.1	Introdução.....	18
1.2.2	Operação Interligada à Rede.....	20
1.2.3	Operação Isolada da Rede	21
1.3	Métodos para Regular Tensão do GI com Carga	28
1.3.1	Introdução.....	28
1.3.2	Regulação por Capacitores Chaveados.....	29
1.3.3	Regulação por controle de fluxo de potência reativa	30
1.3.4	Regulação com Inversor de Frequência.....	31
1.4	Regulação com Capacitores Série	32
1.5	Objetivos.....	33
2	Metodologia.....	34
2.1	Aspectos Gerais	34
2.2	Modelagem do Gerador de Indução com Capacitor Ligado com Cargas Resistivas.....	35
3	Resultados e Discussões.....	38
4	Conclusões.....	45
	Referências Bibliográficas	46

Lista de Figuras

Figura 1 - Máquina de indução com rotor gaiola de esquilo.	16
Figura 2 - Circuito equivalente, por fase, da máquina de indução trifásico	17
Figura 3 - Fluxo de potência da máquina de indução; a) motor; b) gerador.	19
Figura 4 - Gerador de indução para operação isolada da rede.....	21
Figura 5 - Processo de autoexcitação do gerador.	22
Figura 6 - Transitório do processo de autoexcitação.....	22
Figura 7 - Circuito equivalente por fase do gerador de indução isolado, alimentado uma carga qualquer.....	23
Figura 8 - Efeito da velocidade e da capacitância, na tensão gerada.....	25
Figura 9 - Conjugados para diferentes frequências síncronas.	26
Figura 10 - Efeito do ponto de operação para diferentes valores de frequências síncronas.....	27
Figura 11 - Curva característica da tensão gerada quando há aumento de carga.	28
Figura 12 - Esquema de regulação por chaveamento de capacitores.	29
Figura 13 - Tensão gerada conforme variação da carga e acréscimo de capacitores.	30
Figura 14 - Fonte estática para compensar reativos.	30
Figura 15 - Regulação de tensão por inversor e velocidade controlada.	32
Figura 16 - Método capacitor série, por fase.	32
Figura 17 - Comparação entre compensação paralelo e série.	33
Figura 18 - Gerador autoexcitado ligado em estrela com compensação série e cargas resistivas.....	35
Figura 19 - Gerador carga 361Ω e $C_s 5\mu F$, tensão na carga 307 V linha pico.....	39
Figura 20 - Gerador com carga 361Ω e $C_s 20\mu F$, tensão na carga 500V linha pico.....	39
Figura 21 - Gerador com carga 361Ω e $C_s 35\mu F$, tensão na carga 515 V linha pico.....	39
Figura 22 - Gerador com carga 361Ω e $C_s 50\mu F$, tensão na carga 516 V linha pico.....	40
Figura 23 - Gerador com carga $180,5\Omega$ e $C_s 5\mu F$, tensão na carga 178 V linha pico.....	40
Figura 24 - Gerador com carga $180,5\Omega$ e $C_s 20\mu F$, tensão na carga 441 V linha pico.....	41
Figura 25 - Gerador com carga $180,5\Omega$ e $C_s 35\mu F$, tensão na carga 490 V linha pico.....	41
Figura 26 - Gerador com carga $180,5\Omega$ e $C_s 50\mu F$, tensão na carga 500 V linha pico.....	41
Figura 27 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e $C_s 5\mu F$, tensão na carga 123 V linha pico.....	42
Figura 28 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e $C_s 20\mu F$, tensão na carga 377 V linha pico.....	42
Figura 29 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e $C_s 35\mu F$, tensão na carga 460 V linha pico.....	42
Figura 30 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e $C_s 50\mu F$, tensão na carga 484V linha pico.....	43
Figura 31 - Gerador com carga $120,3\text{ ohm}$ e $C_s 100\mu F$, tensão na carga de 488V linha pico.	43

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de operação do gerador para variação de carga e capacitância.....	44
---	----

1 Introdução

Com a recente crise hídrica do Brasil, que abala a principal forma de geração de energia elétrica, juntamente com a necessidade de aumentar a capacidade energética do país, que é feita através de usinas hidrelétricas, tem sido incentivado o estudo de novas formas alternativas de geração de energia, principalmente, as de fontes renováveis.

O gerador de indução tem sido uma alternativa viável para micro e minigeração de energia elétrica, pois apresenta menor custo de aquisição e manutenção em relação aos geradores tradicionais, os síncronos (MARRA; POMILIO, 2000). Este gerador pode ser utilizado em pequenas centrais geradoras, em localidades de baixa densidade populacional, locais afastados dos grandes centros, onde suprimento de energia se torna inviável, devido aos altos custos de transmissão (RESENDE, 1994). Nessas localidades a utilização de um gerador de indução trifásico representa um custo relativamente baixo, incluindo todo o sistema de controle.

Na geração tradicional, no qual utiliza-se o gerador síncrono, há a necessidade de manter a velocidade do gerador constante, maximizando a potência fornecida. A utilização de máquinas de velocidades constantes não consegue o melhor aproveitamento da potência disponível, adequada para as gerações hidrelétricas e eólicas, onde os equipamentos aplicados são de alto custo, necessário para ter uma frequência desejada (JÚNIOR, 2006). A partir da segunda metade do século passado foi descoberta a habilidade de aplicar a máquina de indução como gerador isolado. Este fato se deu devido a sua simplicidade de construção, principalmente, a máquina de indução de rotor em gaiola de esquilo, devido à sua robustez e o fato de não precisar de escovas e, portanto, fontes externas de corrente contínua. O gerador de indução ainda tem autoproteção contra curtos-circuitos, porque deixa de gerar no momento em que ocorre um curto em seus terminais e o fato de poder operar com velocidade variável no seu eixo tem grande aplicabilidade para geração eólica (PINHEIRO, 2007). Também, é facilmente encontrado no mercado para compra e também muito utilizado na indústria (TRAPP, 2008).

O Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo pode ser utilizado para sistemas de geração de energia isolados, com bom custo-benefício, para potências de 50 kVA até 100 kVA, fazendo interligação com a rede de energia elétrica. (CHAPALLAZ, 1992).

A limitação deste gerador é o fato de gerar apenas potência ativa, sendo necessária uma fonte auxiliar para suprimento de potência reativa. Caso a carga seja reativa indutiva a fonte também deve fornecer potência reativa para o mesmo. Quando interligado na rede elétrica, o gerador de indução (GI) consome potência reativa da rede e injeta potência ativa na mesma. O problema está na operação isolada, um banco de capacitores ligado nos terminais do gerador é aplicado para esta finalidade, viabilizando assim, o uso de GI sendo uma alternativa para geração de energia hídrica, eólica e, biogás, biomassa, etc.

1.1 Máquina de Indução

1.1.1 Introdução

A máquina de indução é constituída de duas partes elétricas essenciais, o estator e o rotor. O estator é fixo e o rotor é móvel, e entre eles existe o entreferro. Para potências de até 50 HP o custo de uma máquina de indução é em torno de 40% menor que uma máquina síncrona. A Figura 1, mostra uma máquina de indução de rotor em gaiola de esquilo, sendo a parte externa o estator e a parte interna o rotor (DIAS, 2012).



Figura 1 - Máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo.

O campo magnético girante é o princípio básico de funcionamento de uma máquina de indução trifásica. Ligando os terminais do estator em estrela ou triângulo a uma fonte de tensão alternada trifásica e equilibrada e estando os enrolamentos do estator defasados de 120° , é produzido um campo magnético girante que tem velocidade de giro dada pela Equação 1.

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

Onde n_s é a velocidade síncrona, em rpm, f_s é a frequência da rede, em Hz e p é o número de polos magnéticos da máquina.

Este campo girante, ao atravessar o entreferro da máquina, encontra o rotor totalmente fechado induzindo tensões no rotor, conseqüentemente, havendo circulação de corrente. Essas correntes geram um campo magnético que interage com o campo girante do estator, fazendo com que os dois tendam a alinharem-se, daí produz-se torque, arrastando o rotor em uma velocidade na direção da velocidade do campo girante (RESENDE, 1994).

O movimento relativo entre o campo girante e o rotor é dado pelo escorregamento de acordo com a Equação 2.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

Onde, n_r a velocidade mecânica do rotor, em rpm e s é o escorregamento.

No caso do motor, a velocidade do rotor é sempre menor que a velocidade do campo girante, o escorregamento é positivo. Quando a carga no eixo é aumentada a velocidade diminui, s aumenta, a corrente aumenta e o torque também aumenta.

O circuito equivalente, por fase, de uma máquina de indução trifásica, em regime permanente, é mostrado na Figura 2.

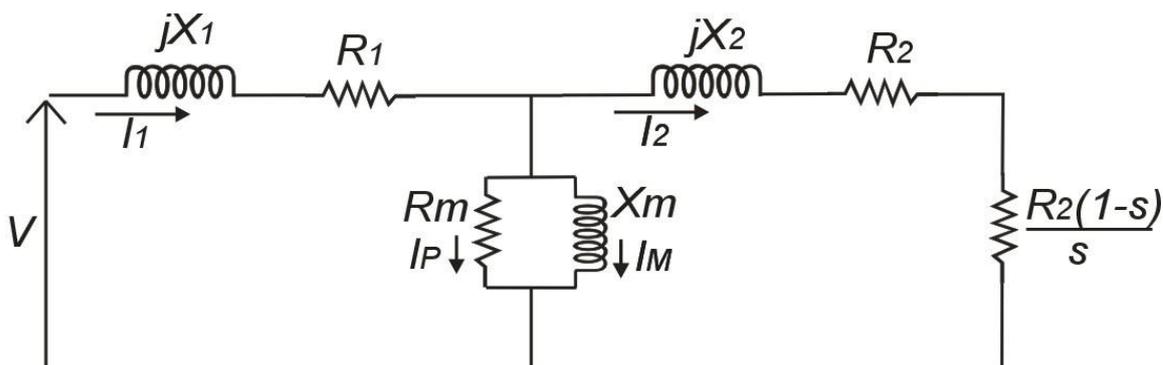


Figura 2 - Circuito equivalente, por fase, da máquina de indução trifásica

Onde:

R_1 : resistência do estator (Ω);

R_2 : resistência do rotor referida ao estator (Ω);

R_m : resistência representativa das perdas no ferro (Ω);

X_1 : reatância de dispersão do estator (Ω);

X_2 : reatância de dispersão do rotor referida ao estator (Ω);

X_m : reatância de magnetização (Ω);

I_p : corrente referente às perdas no núcleo de ferro (A);

I_m : corrente de magnetização (A);

I_1 : corrente no estator (A);

I_2 : corrente no rotor referida ao estator (A); e

V : tensão de alimentação (V).

O circuito da Figura 2 serve apenas para estudar a máquina nas condições de operação em regime permanente, não sendo utilizado para análise dinâmica da mesma, além de não contemplar o efeito da saturação magnética (PINHEIRO, 2007).

1.2 Gerador de Indução Trifásico

1.2.1 Introdução

A máquina de indução opera como motor quando acionada abaixo da velocidade síncrona e como gerador para velocidades do rotor acima da velocidade síncrona. Um fato positivo da máquina de indução, é que toda máquina de indução mesmo sendo projetada para trabalhar como motor, pode fornecer energia elétrica, quando a velocidade do seu eixo é maior que a velocidade síncrona (HOMRICH, 2013).

O funcionamento do gerador será melhor entendido fazendo uma comparação entre os funcionamentos da máquina como gerador e motor. Comparando o fluxo de potência entre as operações da máquina como gerador e motor, através do fluxo de potência interno da máquina, considerando as perdas existentes na máquina, listadas abaixo:

- Perdas mecânicas (na rotação) P_{rot} – Atritos nos rolamentos e ventilação da máquina.
- Perdas no núcleo P_{Fe} – Devido a histerese e correntes de *Focault*, entretanto, na maioria das vezes as perdas no ferro são desprezadas, pois as variações de densidade de fluxo no rotor são ínfimas (HOMRICH, 2013).
- Perdas no cobre (aquecimento, efeito Joule) P_{cue} e P_{cur} – Ocorrem por causa das resistências do enrolamento estator e do rotor.

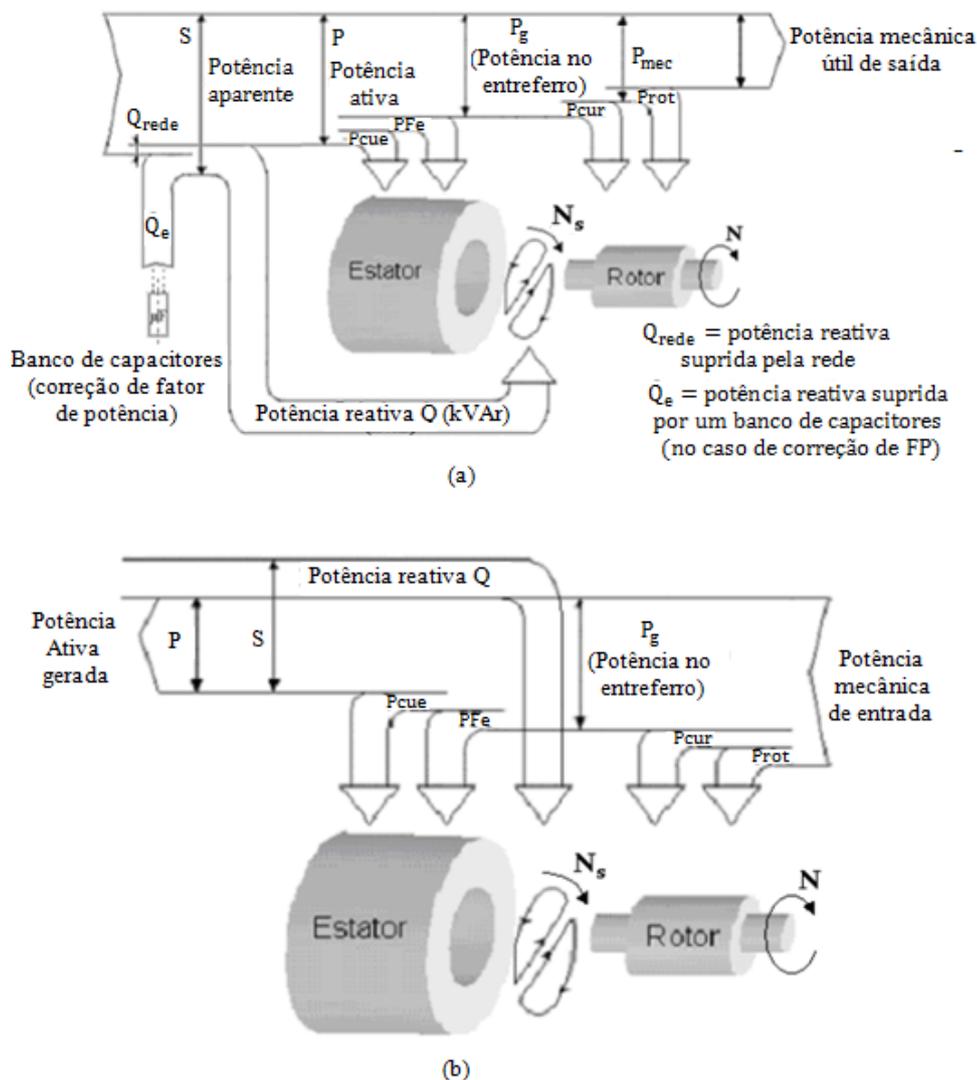


Figura 3 - Fluxo de potência da máquina de indução; a) motor; b) gerador.

Acionando o eixo de uma máquina de indução com uma velocidade superior a velocidade síncrona, haverá inversão do fluxo de potência ativa internamente na máquina para velocidade do rotor maior que a síncrona, o escorregamento é negativo, o GI gera potência ativa, portanto, consome potência reativa da rede.

Geralmente, conforme o fluxo de potência do gerador, Figura 3(b), o rendimento é menor que o motor. Isto ocorre porque a tensão no entreferro é maior que a tensão terminal, diferente do motor, o que provoca maiores perdas no núcleo magnético da máquina. Das Figuras 3(a) e 3(b), observa-se que a potência ativa através do entreferro é maior no gerador do que para o motor.

Quando a máquina é construída especificamente para operar como gerador, modificações construtivas podem melhorar o rendimento. Uma dessas modificações é a redução no valor da resistência do rotor, por não ser necessário torque de partida, o que reduz as perdas Joule nestes enrolamentos (RESENDE, 1994).

1.2.2 Operação Interligada à Rede

O GI possui algumas vantagens em relação ao gerador síncrono quando ligado na rede elétrica, pois, não é necessário sincronizar tensão, frequência e fase a com rede elétrica, bastando apenas seguir alguns procedimentos descritos abaixo: (CHAPALLAZ, 1992) e (HOMRICH, 2013).

- Ainda com o gerador desconectado da rede, faz-se a velocidade do rotor equiparar-se a síncrona, dessa forma ao imprimir tensões no estator, não haverá deslocamento entre o campo e o rotor do gerador, o que diminui os riscos de ter grandes correntes de pico ao conectar-se o GI à rede.
- Entretanto, no momento da conexão o GI se comporta como um curto-circuito na visão da rede, pois o estator ainda não está completamente magnetizado, representando uma pequena reatância. Contudo, esse curto momentâneo não representa problemas para rede ou para o GI.
- Com relação ao fator de potência, é necessário banco de capacitores. Para corrigir o fator de potência, eles podem ser conectados em paralelo às fases do gerador antes da conexão com a rede.
- Quando conectado, deve-se aumentar a velocidade do gerador acima da síncrona, assim, a corrente do gerador, para a rede, atingirá parâmetros nominais.

1.2.3 Operação Isolada da Rede

Na operação isolada, conecta-se capacitores em paralelo com os terminais do estator do gerador para fornecerem reativo para magnetizar o gerador, que trabalha inicialmente somente com o fluxo residual existente, sendo autoexcitado pelos capacitores, como representado na Figura 4.

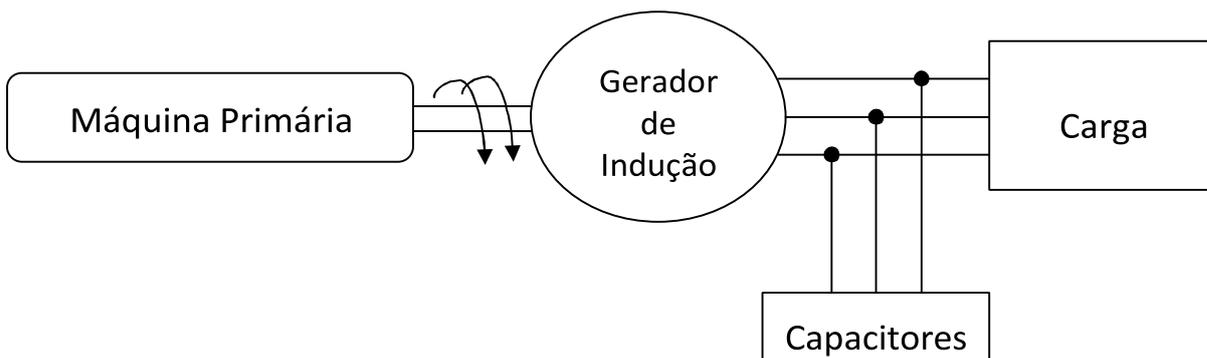


Figura 4 - Gerador de indução para operação isolada da rede.

O processo de autoexcitação do GI é explicado por (PINHEIRO, 2007) (VALADÃO, 2012), onde, inicialmente o eixo da máquina de indução é movimentado, contendo fluxo residual em seu rotor. Então uma tensão alternada é induzida nos terminais do estator, com frequência proporcional a velocidade do eixo. Caso, por algum problema, seja perdido o magnetismo residual, ele pode ser novamente recuperado, simplesmente, ligando temporariamente uma bateria entre os dois terminais do estator, ou mesmo descarregando sobre eles um capacitor. Como esta tensão induzida é aplicada nos capacitores em paralelo, circula uma corrente reativa adiantada no estator, a qual produz um fluxo de reação de armadura, que é acrescentado ao magnetismo residual. Ou seja, a corrente do estator se adianta devido aos capacitores, ficando em fase a corrente do rotor, assim, o fluxo magnético das duas se somam aumentando a magnetização da máquina. Com isso, a tensão induzida no estator aumenta cada vez mais e, conseqüentemente, a corrente circulante no banco de capacitores, aumenta ainda mais o fluxo magnético de excitação do gerador, até que o ponto em que a reta referente à reatância capacitiva intercepta a curva de magnetização da máquina. Neste ponto, tem-se a tensão e frequência geradas pelo gerador em vazio. Este fenômeno é chamado de auto-excitação do gerador de indução, semelhante ao gerador de corrente contínua auto-excitado.

Tal fenômeno também é conhecido como escorvamento do gerador, e pode ser visto na Figura 5.

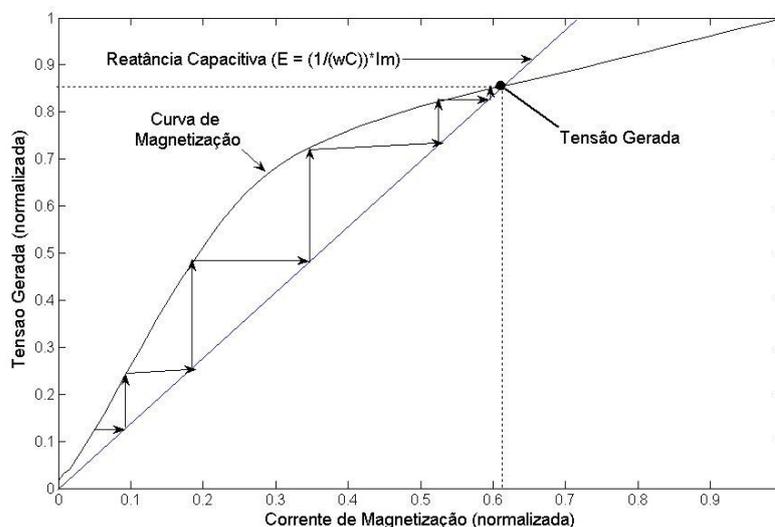


Figura 5 - Processo de autoexcitação do gerador.

A Figura 6 mostra o comportamento da tensão gerada pelo gerador antes de atingir o regime permanente, ponto de operação com tensão e frequência nominal em vazio.

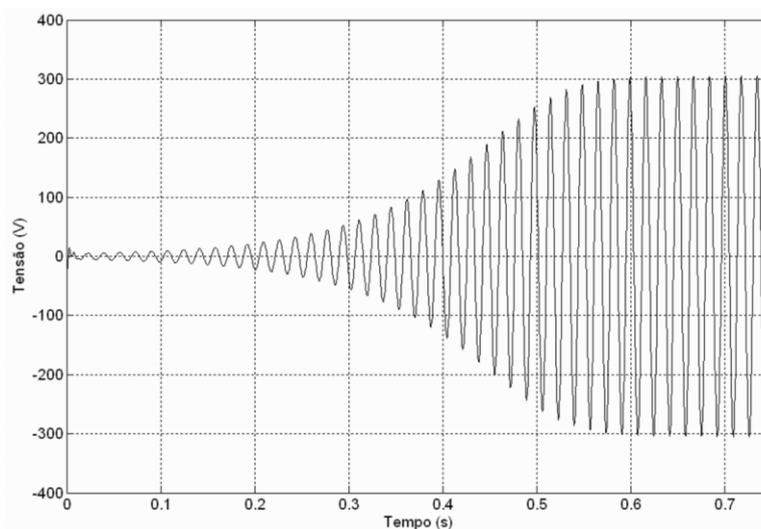


Figura 6 - Transitório do processo de autoexcitação.

Uma característica do gerador isolado é que os cálculos do desempenho são um pouco mais complicados em comparação ao motor de indução, pois para atingir o equilíbrio, este deve operar na região de saturação, não linear, como observado nas figuras. No entanto, a região de saturação deve ser inserida na modelagem do gerador, como é feito por (CALDAS, 1980), através de um bipolo não linear inserido no circuito equivalente da máquina, no lugar da reatância de magnetização. O circuito equivalente é mostrado na Figura 7, somente sendo válido

para o regime permanente da máquina. Para estudar melhor o processo do processo de escorvamento, saturação do gerador, harmônicos e transitórios, é preciso de uma modelagem mais elaborada.

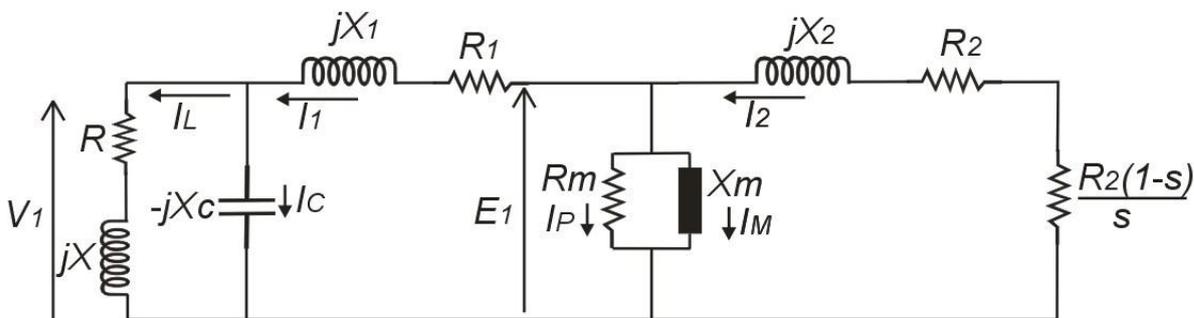


Figura 7 - Circuito equivalente por fase do gerador de indução isolado, alimentado uma carga qualquer.

A simbologia no circuito acima é a mesma da Figura 2, sendo ainda:

V_1 : tensão terminal gerada.

R: resistência da carga.

X: reatância da carga.

X_c : reatância do capacitor de autoexcitação.

I_L : corrente na carga.

I_c : corrente no capacitor de autoexcitação.

A partir do circuito da Figura 7, é possível fazer uma análise quantitativa para o regime permanente da máquina e mostrar que ela fornece tensão estável, quando a reatância capacitiva é aproximadamente igual a reatância de magnetização da máquina, como proposto por (CALDAS, 1980). Com isso, faz-se o equilíbrio de potência reativa.

$$Q_C = Q_L$$

$$\frac{V_1^2}{X_C} = \frac{E_1^2}{X_M} + I_1^2 X_1 + I_2^2 X_2 \quad (3)$$

Assim, Q_C é a potência capacitiva e Q_L é a potência indutiva. Com isso, supondo que o gerador está sem carga, à vazio, o escorregamento é praticamente nulo e o ramo referente ao rotor pode ser considerado uma impedância infinita. E, desprezando as quedas devido aos enrolamentos do estator, vê-se, que $E_1 \simeq V_1$ e a Equação 3 é simplificada para:

$$\frac{V_1^2}{X_C} = \frac{V_1^2}{X_M} \quad (4)$$

O que resulta em :

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

E

$$X_C = \frac{1}{\omega_s C} \quad (6)$$

Onde ω_s é a frequência angular síncrona da máquina.

Da relação demonstrada fica claro que a tensão final que o gerador fornece depende do valor do capacitor utilizado. Isso pode ser visto na Figura 5, onde, caso o capacitor seja muito pequeno, a inclinação da reta será maior e a interceptação com a curva de magnetização ocorrerá em um ponto onde a tensão induzida é mais baixa. Capacitância alta causa o processo inverso, ou seja, pode fazer com que a reta referente à reatância capacitiva intercepte a curva de magnetização em uma região onde a tensão gerada torna-se muito alta. Situações críticas podem ocorrer: caso o capacitor seja muito pequeno, o processo de escorvamento pode ser impedido, pois a reta se interceptará com a curva de magnetização na região, onde, existe praticamente apenas o fluxo residual; e o banco de capacitores sobrepõe à região linear da curva, tornando possível diversos valores de tensões, assim, o gerador se torna instável (PINHEIRO, 2007).

Já que a frequência da tensão gerada é diretamente proporcional à velocidade, variações na rotação do eixo irão interferir nos valores da tensão de saída e frequência gerada. Quando há uma redução de velocidade, a curva de magnetização se desloca para baixo, ao mesmo tempo em que a reta da reatância capacitiva aumenta sua inclinação, como mostrado na Equação 6.

Então, redução de velocidade e aumento da reatância capacitiva causam uma redução significativa da tensão terminal do gerador, como pode ser visto na Figura 8. Também é ilustrado o processo inverso, ou seja, um aumento na tensão devido a uma aceleração do eixo da máquina.

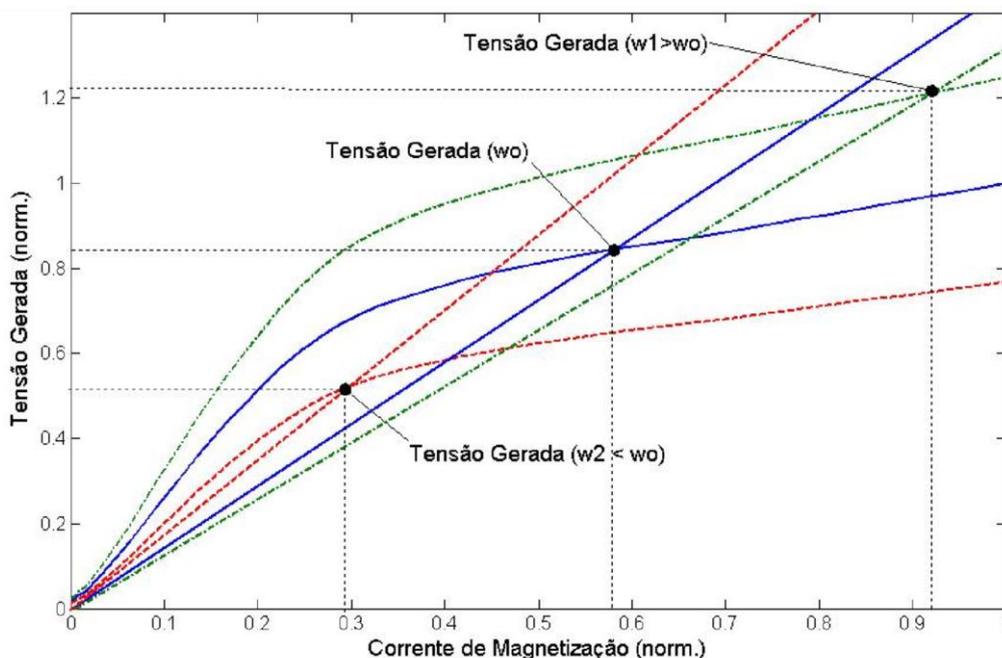


Figura 8 – Efeito da velocidade e da capacitância, na tensão gerada.

A análise realizada do desempenho feita é válida somente para ele em vazio, isso significa que a potência ativa referente as perdas é dada pela máquina primária que movimenta o eixo do gerador, e a potência reativa é dada pelos capacitores ligados em paralelo com o gerador. O que limita o uso do GI, é que a adição de carga aos seus terminais resulta numa queda de frequência e tensão. Então, como a regulação de tensão é considerada insatisfatória, este trabalho faz um estudo deste comportamento (RESENDE, 1994) (PINHEIRO, 2007).

Desprezando as perdas elétricas e mecânicas na máquina, a potência mecânica no eixo convertida em potência elétrica é dada pela Equação 7:

$$P_{mec} = w_{mec} T_{mec} \quad (7)$$

Onde, P_{mec} é a potência mecânica no eixo do gerador (W), w_{mec} é a velocidade mecânica do rotor (rad/s) e T_{mec} é o conjugado mecânico (N.m).

Quando uma carga resistiva é ligada aos terminais do estator, o aumento da potência ativa requerida do gerador é semelhante ao caso do motor de indução, quando a carga mecânica no eixo é aumentada. Portanto, se não aumentar a velocidade do eixo, a única forma do gerador fornecer a potência ativa para carga é aumentar o valor do conjugado eletromagnético (MARRA; POMÍLIO, 2000). Aumentado o escorregamento, aumenta-se o conjugado eletromagnético, mas o escorregamento cresce somente diminuindo a frequência da tensão

gerada. Essa queda na frequência síncrona faz com que o ponto de operação estável da máquina passe a ocorrer para valores bem menores de tensão eficaz, tanto devido à redução na amplitude da curva de magnetização, como ao aumento correto na inclinação da reta referente à reatância capacitiva, que é inversamente proporcional à frequência síncrona, como evidenciado na Equação 8.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_s C} \quad (8)$$

Nas Figura 9 e Figura 10 (MARRA; POMÍLIO, 2000), é mostrado o efeito do acoplamento da carga, que aumenta o escorregamento, e evidenciando a curva de conjugado para diferentes frequências, e os diferentes pontos de operação do gerador, sendo $f_{s1} > f_{s2}$.

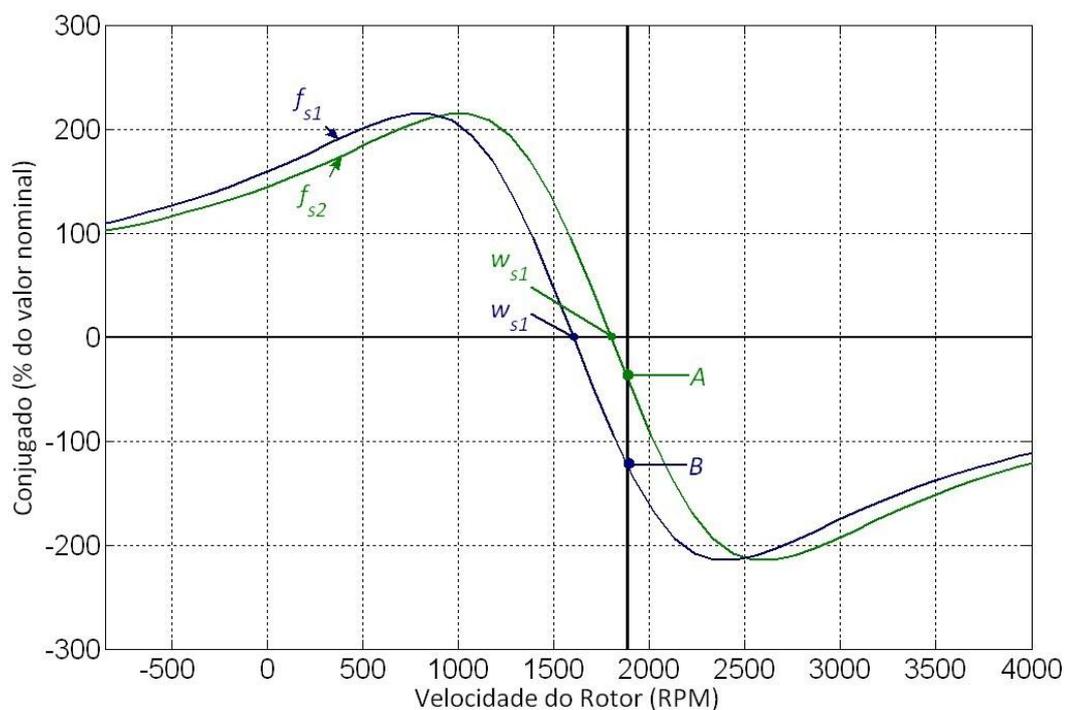


Figura 9 - Conjugados para diferentes frequências síncronas.

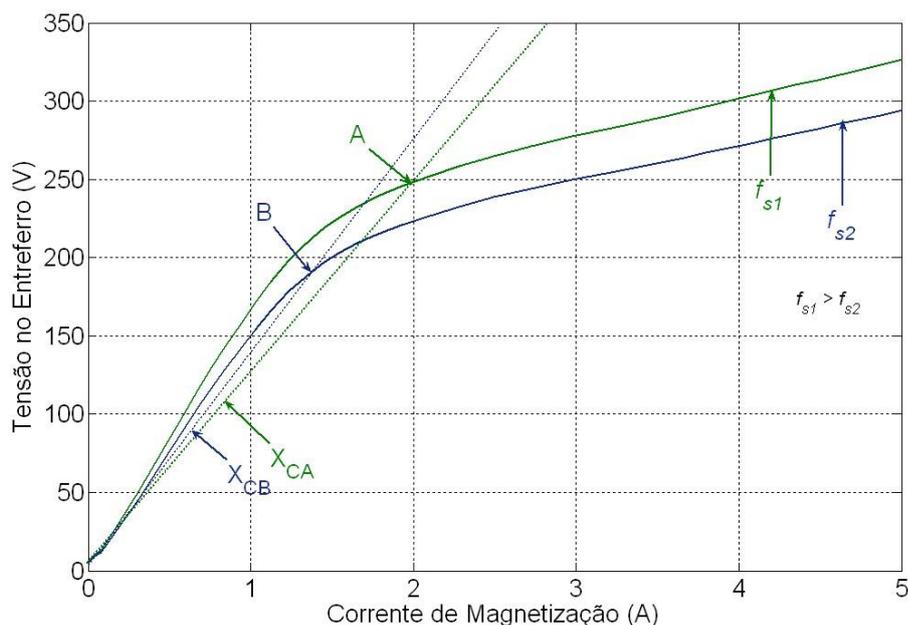


Figura 10 - Efeito do ponto de operação para diferentes valores de frequências síncronas.

Os pontos A e B nas Figura 9 e Figura 10 indicam situações com menor e maior carga alimentadas pelo gerador, respectivamente, e evidenciando a redução da frequência síncrona para o aumento do conjugado.

O maior problema na regulação de tensão do gerador é quando a carga a ser alimentada possui características indutivas. Como o gerador só produz potência ativa, a potência reativa que a carga requer deve ser fornecida pelos capacitores de autoexcitação. Assim, a corrente de magnetização do gerador se reduzirá, o que causa queda na tensão gerada. Para melhor entender esse efeito indutivo, basta colocar a parcela indutiva em paralelo com os capacitores de autoexcitação, pois nessa configuração, para o gerador em regime permanente, fica clara a redução da capacitância do sistema (CALDAS, 1980). Então, nota-se que a tensão do gerador de indução também depende do fator de potência, sendo que a tensão cai quando os fatores de potência são bem menores que 1 (RESENDE, 1999).

1.3 Métodos para Regular Tensão do GI com Carga

1.3.1 Introdução

Quando trabalha-se com o gerador de indução gaiola de esquilo, é possível manipular três grandezas externas com a intenção de manter a frequência e a tensão gerada constantes. São elas: a velocidade de acionamento, as características da carga e a potência reativa fornecida para a excitação do gerador.

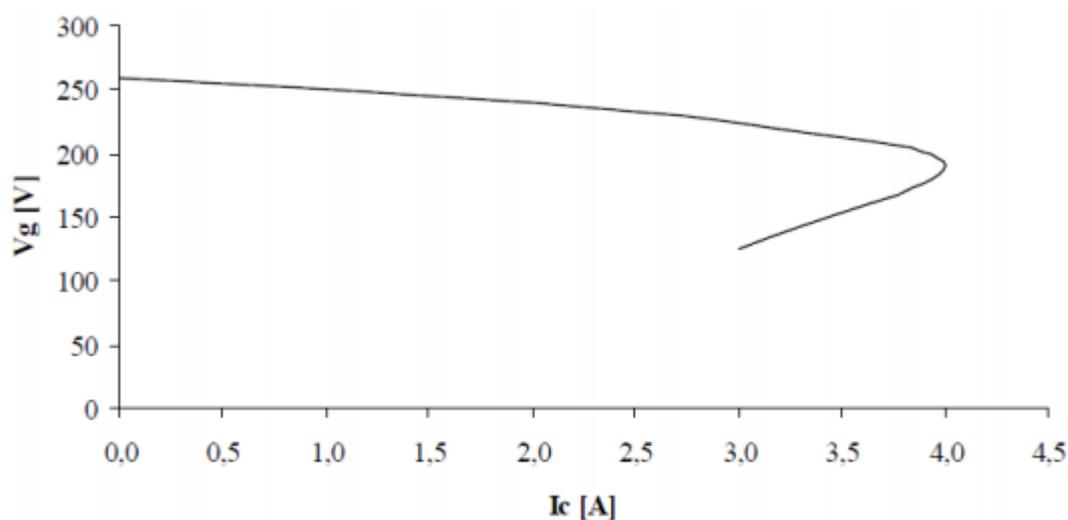


Figura 11 - Curva característica da tensão gerada quando há aumento de carga.

Onde:

V_g é a tensão gerada.

I_c é a corrente na carga.

A Figura 11 mostra que a tensão gerada decai com o aumento da carga. Neste trabalho, a potência reativa fornecida pelos capacitores ao gerador, é regulada, para melhorar o desempenho da tensão e tentar manter frequência gerada constante.

1.3.2 Regulação por Capacitores Chaveados

Para pequenas variações na amplitude da tensão, uma forma de melhorar a regulação de tensão do GI isolado é chavear capacitores acoplados em paralelo com o gerador (KUPERMAN; RABINOVICI, 2004b). Um capacitor é mantido fixo para manter a tensão no valor nominal, quando o gerador está em vazio. Conforme a carga aumenta, capacitores são inseridos ou retirados do sistema manualmente, ou através de contatores, em paralelo ao capacitor original, de forma a elevar a potência reativa fornecida ao gerador.

A Figura 12 mostra como funciona a regulação, através do chaveamento de capacitores conforme, a carga varia os capacitores CI, CII, CIII são acrescentados ou retirados do circuito, pelos relés Ra, Rb e Rc que monitoram a necessidade de aumentar ou não a tensão.

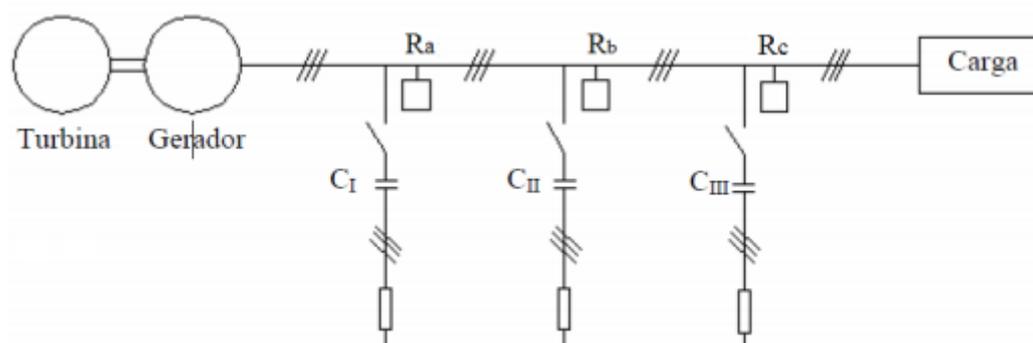


Figura 12 - Esquema de regulação por chaveamento de capacitores.

A Figura 13 ilustra a operação desses bancos de capacitores através da inserção de capacitores a medida que a potência aumenta. É importante lembrar que deve ser feita a correção da velocidade do rotor para esse método, a fim de manter a frequência gerada constante, que é uma desvantagem dessa regulação, assim como a necessidade de um sistema robusto de controle responsável para inserir e retirar os capacitores, quando há bruscas mudanças de cargas, para evitar sobretensão ou desmagnetização do gerador.

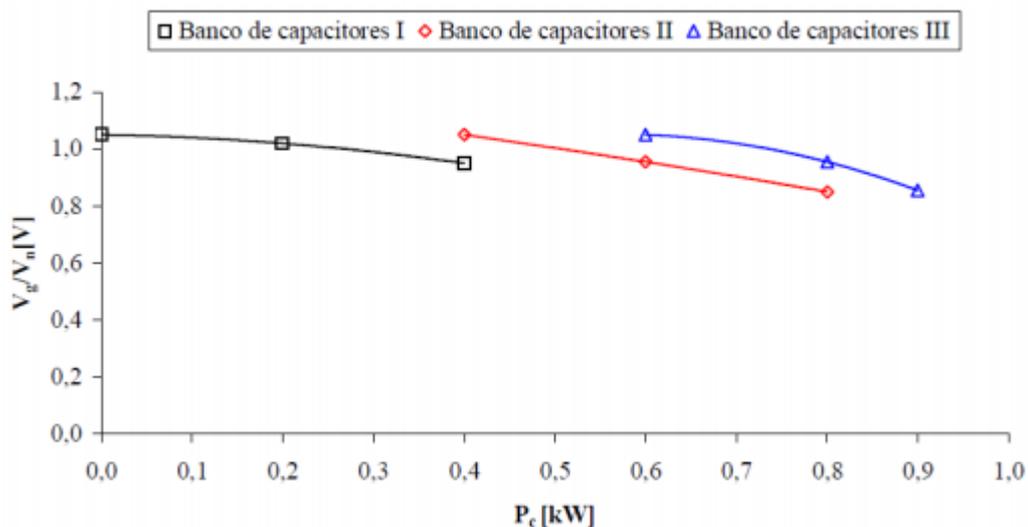


Figura 13 - Tensão gerada conforme variação potência (P_c) da carga e acréscimo de capacitores.

1.3.3 Regulação por controle de fluxo de potência reativa

Este método também é conhecido como fonte estática de compensação de reativos, que consiste em adicionar indutores controlados por tiristores e capacitores, representado na Figura 14. Como já foi exposto, os capacitores tem a finalidade de alimentar o gerador e as possíveis cargas indutivas do sistema, como motores. Então, para uma variação de carga, acionamentos de motores ou desligamento, os tiristores compensam a saída ou entrada de carga indutiva variando o ângulo de disparo, assim, a tensão gerada pode ser mantida constante.

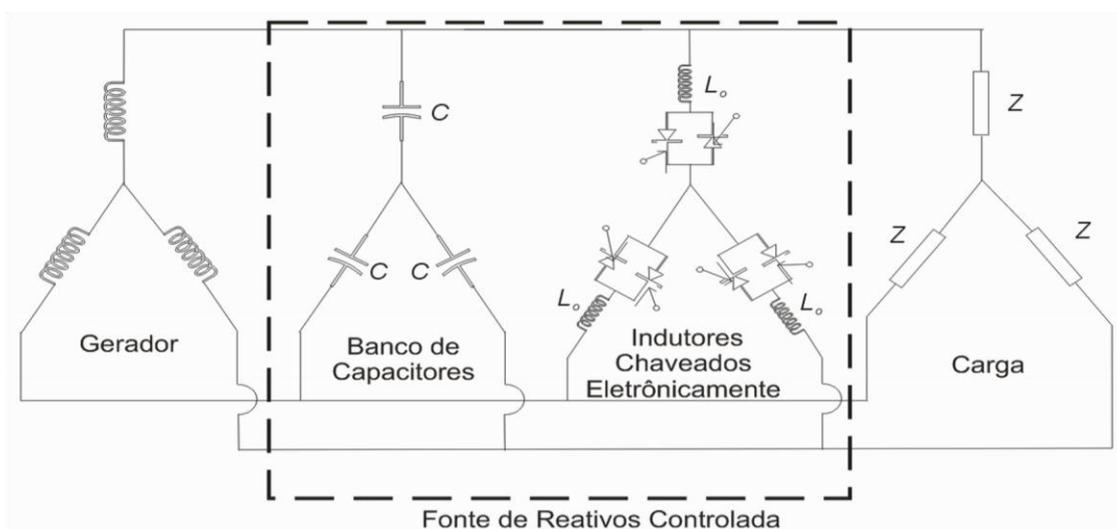


Figura 14 - Fonte estática para compensar reativos.

O ângulo de disparo dos tiristores altera a potência reativa dada ao gerador. Para isso, a fonte compensadora, em paralelo com o gerador, deve absorver toda potência reativa excedente quando o gerador está sem carga, ou seja, a vazio. Conforme a carga aumenta, o ângulo de disparo também aumenta de forma que a chave compensadora deixa de consumir reativo para que a carga e o gerador o consuma. Para um bom funcionamento dessa ligação, ao projetar-se a fonte compensadora à mesma, deve atingir o limite de carga juntamente com o ângulo máximo de disparo do tiristor (90°) tornando nula a corrente que circula pelos indutores de compensação (RESENDE, 1994).

1.3.4 Regulação com Inversor de Frequência

O inversor melhora o regulamento da tensão e da frequência gerada e ajuda na compensação do reativo. A estratégia de uso baseia-se na fixação da frequência síncrona do gerador através do inversor PWM, representado na Figura 15. Basicamente faz-se duas estratégias para o balanço de potência e ajuste da tensão (HOMRICH, 2013). Uma é regulando a velocidade do rotor e a outra é enviando parte da energia acumulada no lado contínuo do inversor para a rede, caso a velocidade do rotor não seja regulada, o que estabiliza o sistema (MARRA e POMILIO, 2000).

- Sistema com controle de velocidade

Recomendado para sistemas de geração onde a fonte primária de energia apresenta custo elevado, geração a Diesel, e é preciso regular a velocidade da máquina primária, com finalidade de controlar a potência gerada.

- Sistema sem controle de velocidade

Neste caso, o excedente de energia gerada não consumida pela carga CA, pode ser enviado à rede e pode ser aplicada em propriedades rurais atendidas por linhas monofásicas, com disponibilidade hídrica para geração, porém, na ausência da rede, essa energia excedente pode ser consumida por cargas do próprio inversor.

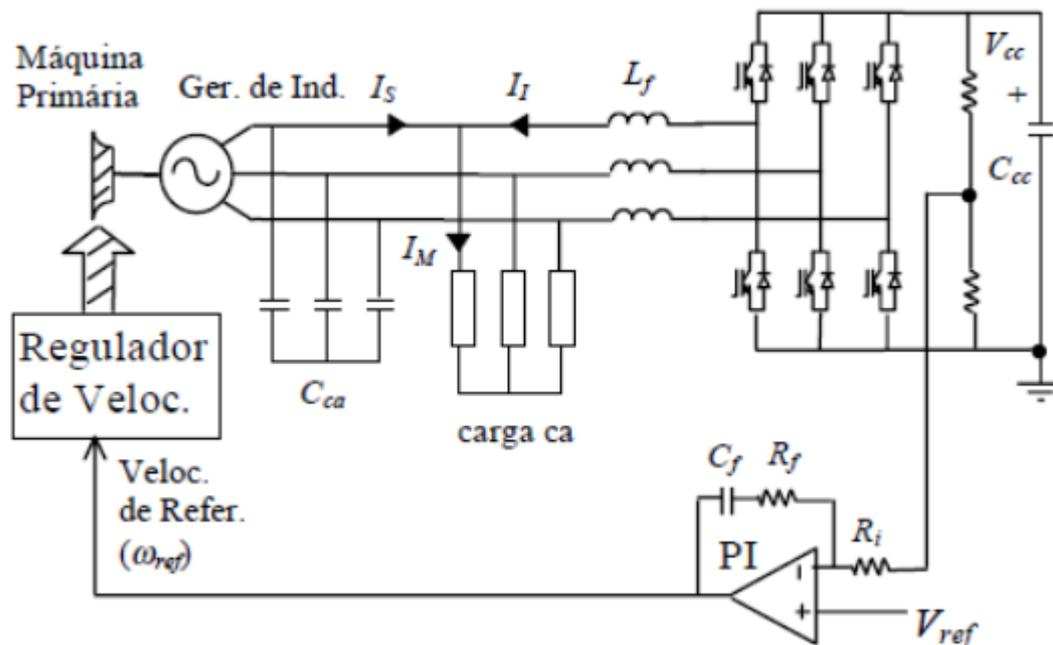


Figura 15 - Regulação de tensão por inversor e velocidade controlada.

1.4 Regulação com Capacitores Série

Neste tipo de regulação, além do capacitor em paralelo para autoexcitar o gerador, também é colocado em série com a carga um outro capacitor para compensar as quedas de tensões e fornecer reativo a carga, já que ao colocar um capacitor em série com a carga, a capacitância equivalente vista dos terminais do gerador aumenta, como mostrado na Figura 16.

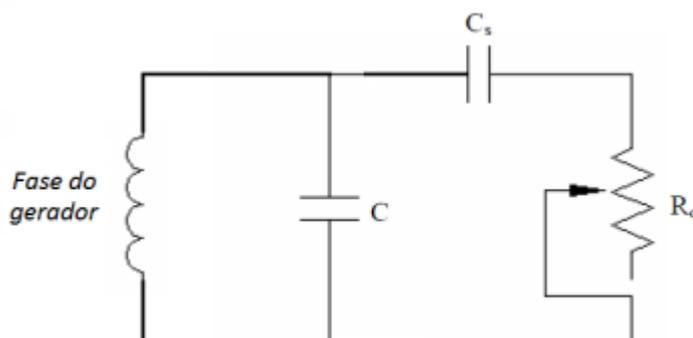


Figura 16 - Método capacitor série, por fase.

Onde :

C = capacitor para autoexcitação do gerador de indução ($\mu\text{F}/\text{fase}$);

C_s = capacitor série ($\mu\text{F}/\text{fase}$);

R_c = resistência da carga (Ω/fase);

Com o aumento da capacitância tem-se a elevação da tensão interna, assim, as quedas de tensão internas, devido às perdas nos circuitos do estator e do rotor, são compensadas pela elevação de tensão.

O efeito da inserção do capacitor série é mostrado na Figura 17, a tensão gerada é mais estável, já que com a presença do capacitor série, ao aumentar-se a corrente da carga, este fornece reativo à carga e mantém a magnetização.

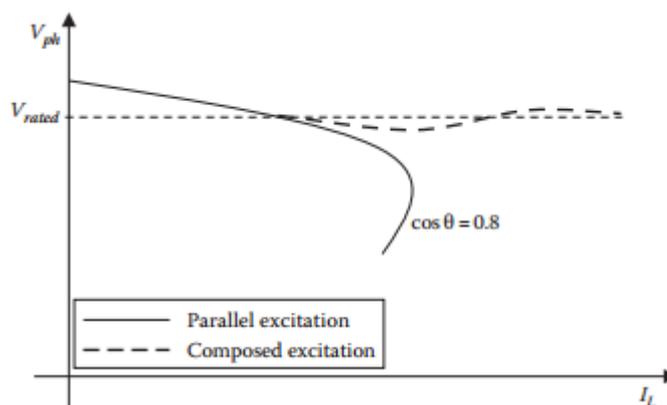


Figura 17 - Comparação entre compensação paralelo e série.

1.5 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de uma modelagem matemática do gerador de indução trifásico de rotor em gaiola de esquilo, considerando os efeitos da saturação magnética. Utilizando para tal um software iterativo de alta performance voltado para o cálculo numérico, para a implementação do algoritmo de modelagem.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Verificar a regulação de tensão utilizando capacitores em série, para o GI operando isolado da rede;
- Variar a carga alimentada pelo gerador e alterar capacitâncias série.

2 Metodologia

2.1 Aspectos Gerais

A modelagem da máquina de indução trifásica, desenvolvida por (RESENDE, 1999), foi utilizada para a simulação do gerador de indução.

Nesta modelagem é considerada a presença de funções harmônicas, que podem ser obtidas experimentalmente, através de ensaios em laboratório da máquina, onde é incluída a saturação magnética, essencial na operação do gerador. Também é possível estudar o comportamento dinâmico do gerador.

A solução das equações do modelo é realizada numericamente, integrando-se variáveis de estado, com as equações diferenciais do modelo, organizadas em forma matricial. Tomando como variáveis de estado, o concatenamento total de fluxo, e para o caso da operação como gerador, as tensões de fase e as correntes da carga, quando esta for indutiva.

Maiores esclarecimentos e entendimentos da solução numérica da modelagem encontra-se em (RESENDE, 1999).

2.2 Modelagem do Gerador de Indução com Capacitor Ligado com Cargas Resistivas

De acordo, com (RESENDE, 1999), a modelagem foi implementada para simular o gerador proposto neste trabalho.

A Figura 18 mostra parâmetros adicionais implementados na modelagem.

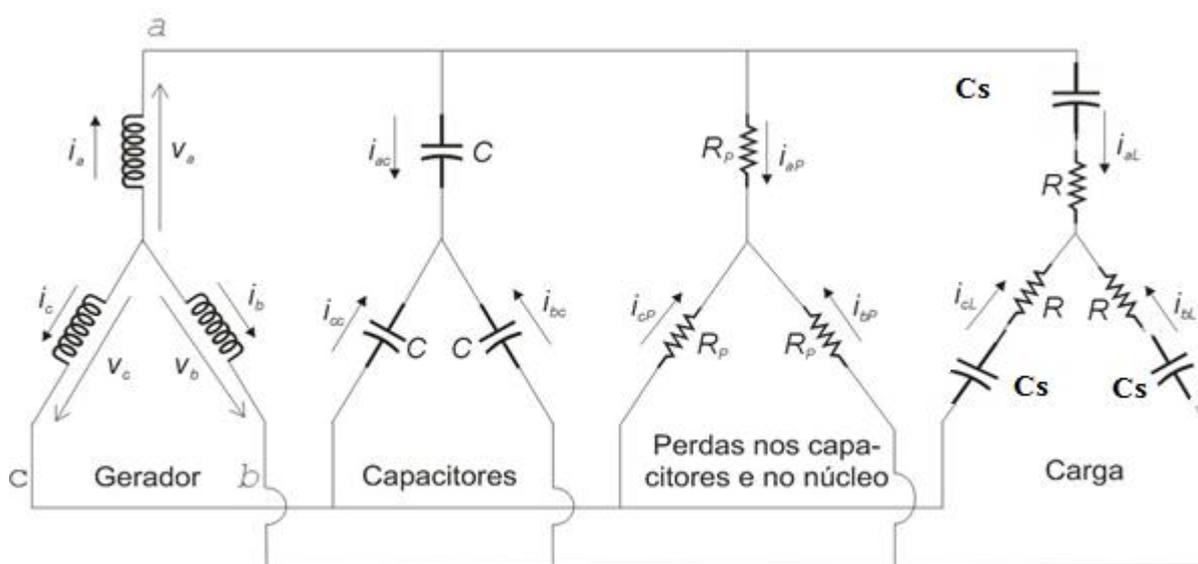


Figura 18 - Gerador autoexcitado ligado em estrela com compensação série e cargas resistivas.

Na Figura 18, $i_{(a,b,c)}$ representa a corrente de fase do estator, $i_{(a,b,c)C}$ são as correntes de cada capacitor em paralelo, $i_{(a,b,c)L}$ a corrente na carga, $i_{(a,b,c)P}$ é a perda no enrolamento de cada fase, R é a resistência da carga, R_p a resistência dos capacitores e núcleo, e C_s é o capacitor em série com a carga.

A partir da Equação 10, que é a equação geral para qualquer dispositivo eletromagnético

$$v_i = R_s i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (10)$$

v_i , i_i e λ_i representam a tensão, a corrente e o concatenamento de fluxo por fase, respectivamente, e R_s é a resistência de fase dos enrolamentos do estator.

E conforme (RESENDE, 1999), a corrente em uma fase genérica qualquer é dada pela Equação 11.

$$i_i = \frac{\lambda_i - \lambda m_i}{L_s} \quad (11)$$

Onde λm_i é o fluxo magnetizante da fase i e L_s é a indutância de dispersão dos enrolamentos de fase do estator.

Admitindo carga equilibrada e da 2ª lei de Kirchoff das correntes na Figura 18, tem-se:

$$-i_i + i_{iC} + i_{iP} + i_{iL} = 0 \quad (12)$$

$$i_{iC} = C \frac{dv_i}{dt} \quad (13)$$

$$i_{iP} = \frac{v_i}{R_p} \quad (14)$$

Onde:

i_i é a corrente da fase genérica i do estator (A).

i_{iC} é a corrente da fase genérica i no banco de capacitores em paralelo (A).

i_{iP} é a corrente devido as perdas no ferro (A).

i_{iL} é a corrente na associação em série do capacitor C_s e a resistência R da Figura 18 (A).

Substituindo as Equações 11, 13 e 14 na Equação 12, obtém-se a Equação 15 .

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{(\lambda_i - \lambda m_i)}{CL_s} - \frac{v_i}{CR_p} - \frac{i_{iL}}{C} \quad (15)$$

Adicionando a carga é acrescentada mais uma variável por fase, ou seja, a corrente da carga, está relação é:

$$\frac{di_{iL}}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dv_i}{dt} - \frac{i_{iL}}{RC_s} \quad (16)$$

O concatenamento de fluxo é obtido através da Equação 11:

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = v_i - R_s i_i \quad (17)$$

O Sistema de equações a ser resolvido é dado pelas Equações 15, 16 e 17, que serão implementadas computacional para a simulação.

3 *Resultados e Discussões*

A máquina de indução utilizada na simulação, possui potência de 2 CV, 1720 RPM e trabalha em ligação estrela e tem tensão de linha de 380 V rms ou 537 V de pico. Os parâmetros dessa máquina são dados:

- Resistência do estator: $R_s = 3,11\Omega$.
- Resistência do rotor: $R_r = 3,8\Omega$.
- Indutância de dispersão do estator: $L_s = 8,4mH$.
- Indutância de dispersão do rotor: $L_r = 8,4mH$.
- Resistência deperdas no ferro: $R_p = 390\Omega$.

Esses parâmetros são obtidos realizando ensaios de rotor bloqueado e ensaio à vazio. Então, a partir da modelagem desenvolvida e do algoritmo de solução numérica implementado no software computacional, pode-se obter o comportamento das características do gerador de indução trifásico como correntes no gerador, tensão gerada e tensão na carga.

O gerador é simulado para três valores de carga e quatro capacitâncias em série, para cada carga. A fim de observar o comportamento da tensão e da corrente, para tanto, foi mantida a velocidade do gerador constante. Assim, o efeito do aumento de carga e capacitâncias é restringido a variação de corrente e tensão do GI.

Os valores de carga são 361Ω ; $180,5\Omega$ e $120,3\Omega$. Já as capacitâncias são $5\mu F$; $20\mu F$; $35\mu F$ e $50\mu F$. Sendo o capacitor utilizado para autoexcitação inicial da máquina de $33,2\mu F$, como explicado na Seção 1.2.3.

Da Figura 19 à Figura 22, são mostrados os gráficos da corrente e tensão para carga de 361Ω e os capacitores em série variando conforme descrito anteriormente.

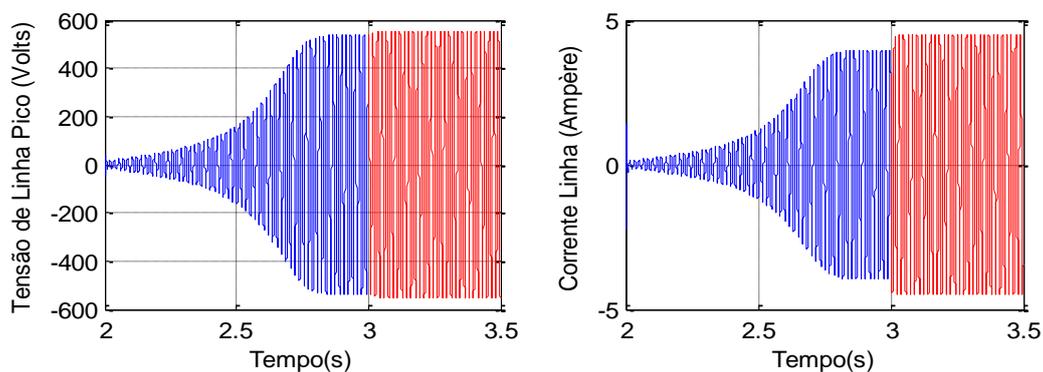


Figura 19 - Gerador carga 361Ω e C_s $5\mu\text{F}$, tensão na carga 307 V linha pico.

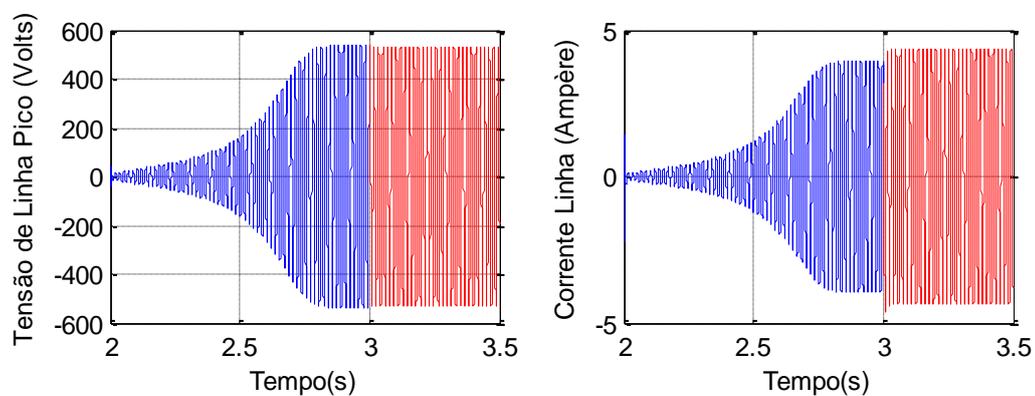


Figura 20 - Gerador com carga 361Ω e C_s $20\mu\text{F}$, tensão na carga 500V linha pico.

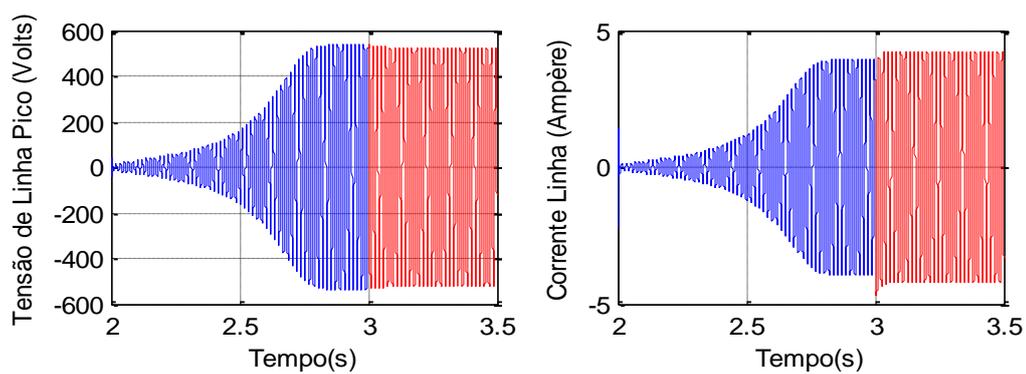


Figura 21 - Gerador com carga 361Ω e C_s $35\mu\text{F}$, tensão na carga 515 V linha pico.

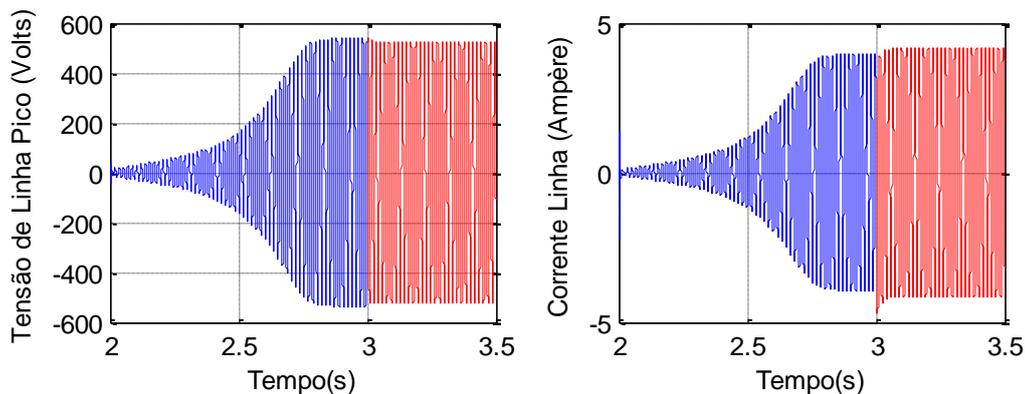


Figura 22 - Gerador com carga 361Ω e $C_s 50\mu\text{F}$, tensão na carga 516 V linha pico.

Nota-se que o valor da tensão de linha de pico na carga aumenta conforme o capacitor em série aumenta, assim a carga passa a trabalhar em condições mais próximas das requeridas pelo sistema elétrico que é 537 V de linha de pico. Mas é necessário fazer uma investigação do que ocorre quando aumenta-se a carga, que o gerador alimenta.

Assim, da Figura 23 à Figura 26, são exibidos os valores de tensão de linha e corrente, para uma carga de $180,5\Omega$. E alterou-se os capacitores para analisar os efeitos do aumento da carga associada com cada capacitor.

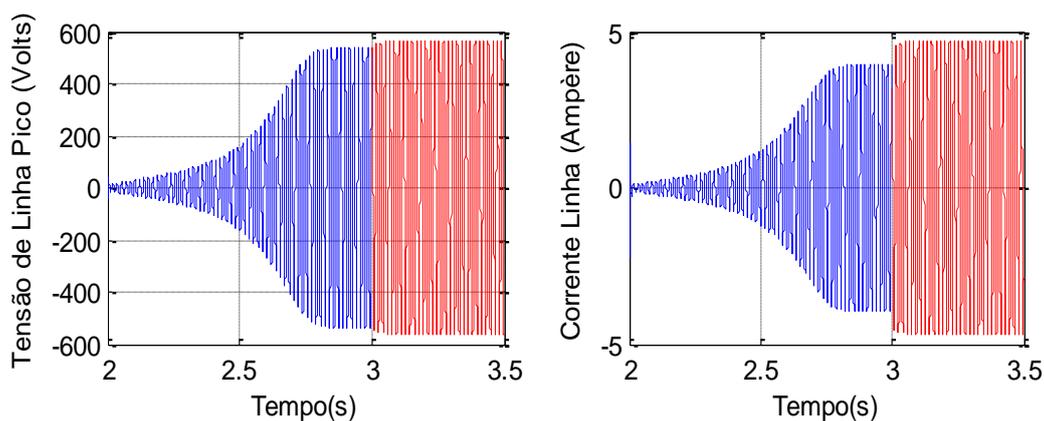


Figura 23 - Gerador com carga $180,5\Omega$ e $C_s 5\mu\text{F}$, tensão na carga 178 V linha pico.

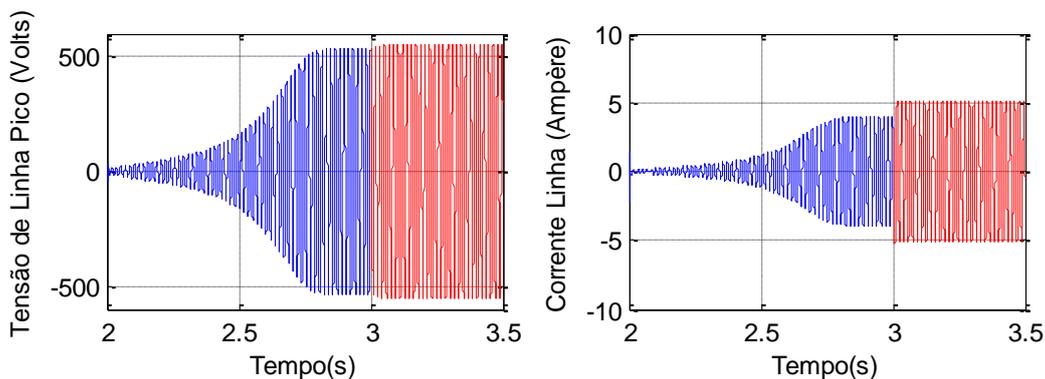


Figura 24 - Gerador com carga 180.5Ω e $C_s 20\mu F$, tensão na carga 441 V linha pico.

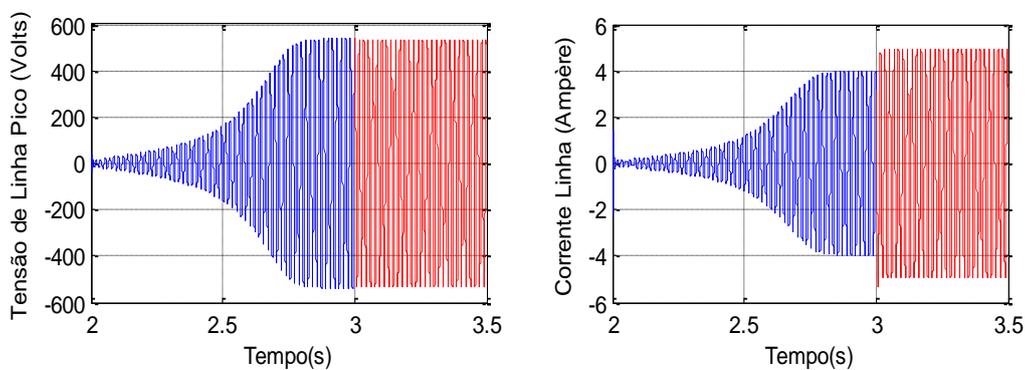


Figura 25 - Gerador com carga 180.5Ω e $C_s 35\mu F$, tensão na carga 490 V linha pico.

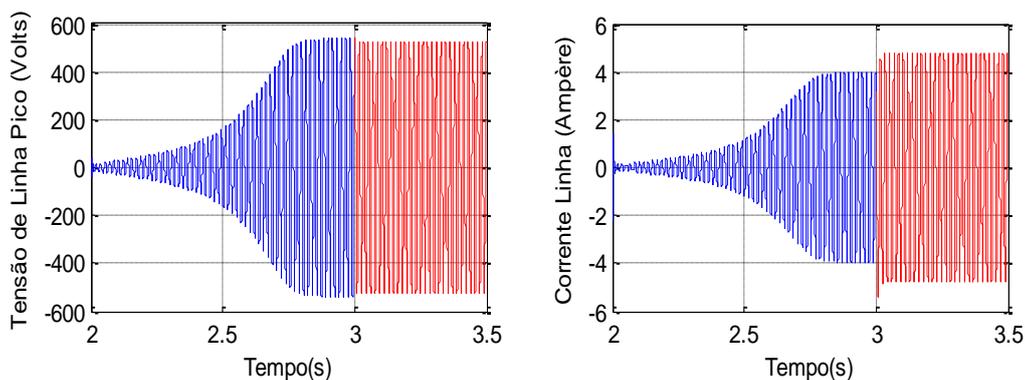


Figura 26 - Gerador com carga 180.5Ω e $C_s 50\mu F$, tensão na carga 500 V linha pico.

Novamente, tem-se o melhoramento da tensão na carga quando aumenta-se a capacitância em série. Apesar, da queda da tensão na carga quando comparada à carga anterior ser ligeiramente menor.

A partir daí, aumentou-se ainda mais a carga resistiva, afim de, comparar para qual capacitor tem-se níveis aceitáveis de tensão na carga. Além, de atentar-se que para valores de

capacitâncias pequenas não regulam bem a tensão na carga, apesar de forçarem o gerador a ter um a tensão maior a tensão nominal em seus terminais.

E da Figura 27 a Figura 30, usa-se a carga de $120,33\Omega$.

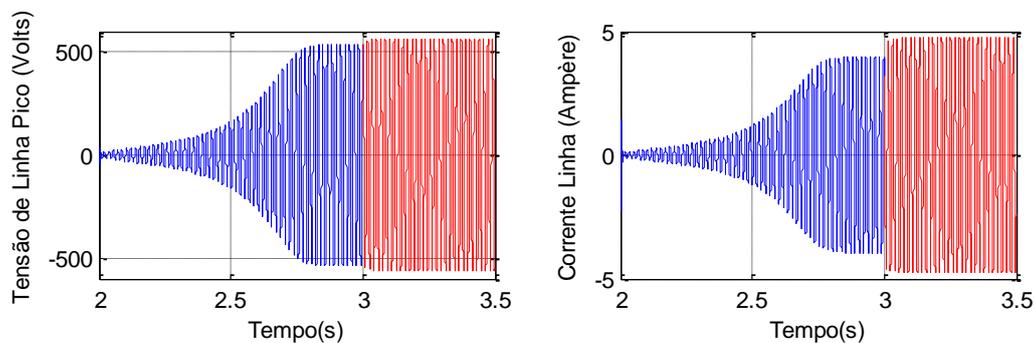


Figura 27 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e C_s $5\mu\text{F}$, tensão na carga 123 V linha pico.

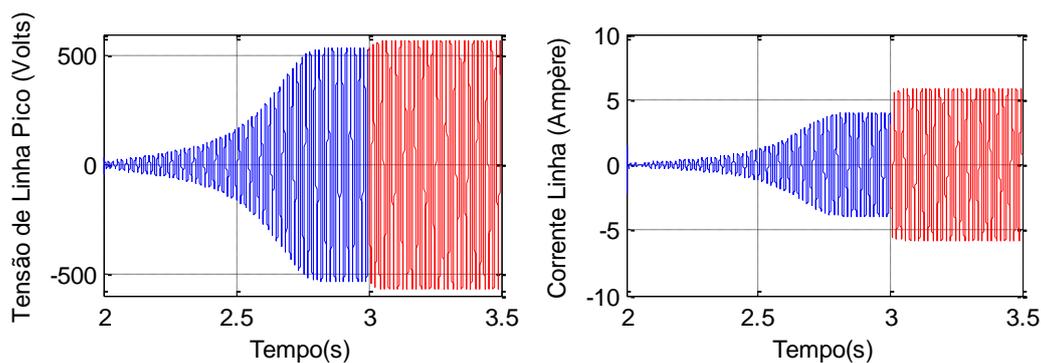


Figura 28 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e C_s $20\mu\text{F}$, tensão na carga 377 V linha pico.

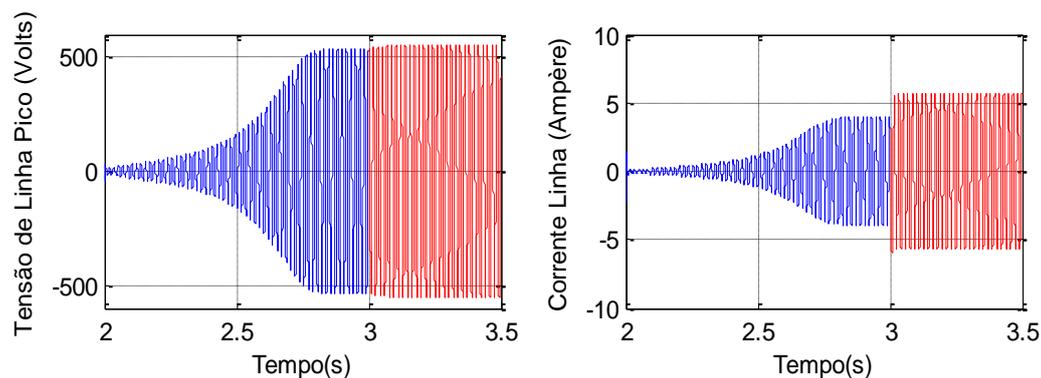


Figura 29 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e C_s $35\mu\text{F}$, tensão na carga 460 V linha pico.

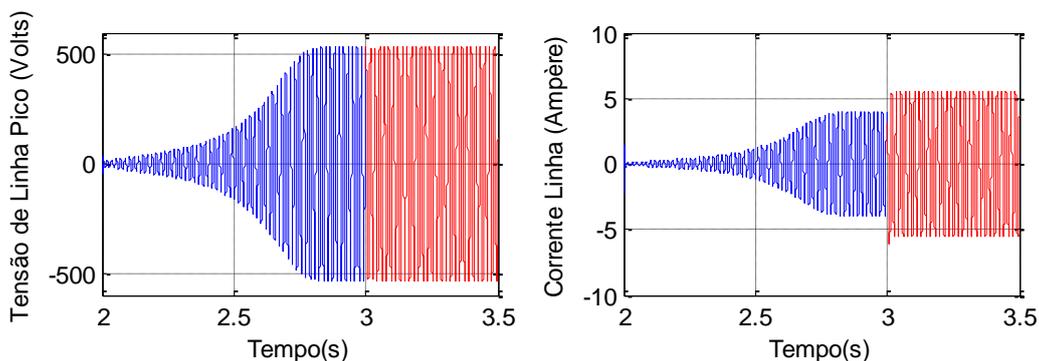


Figura 30 - Gerador com carga $120,3\Omega$ e C_s $50\mu\text{F}$, tensão na carga 484V linha pico.

Com a análise para as cargas e capacitâncias mostradas nos gráficos, é notório que a capacitância de $50\mu\text{F}$ melhor regula a tensão do gerador principalmente para baixa potência, mesmo com o fato do pequeno afundamento da tensão gerada, durante o acoplamento da carga. Pois, foi a capacitância que melhor ofereceu condições de trabalho, na visão da carga, apesar da tensão gerada ser mais baixa que a nominal. Por isso, aumentou-se drasticamente a capacitância, para $100\mu\text{F}$, o que é mostrado na Figura 31.

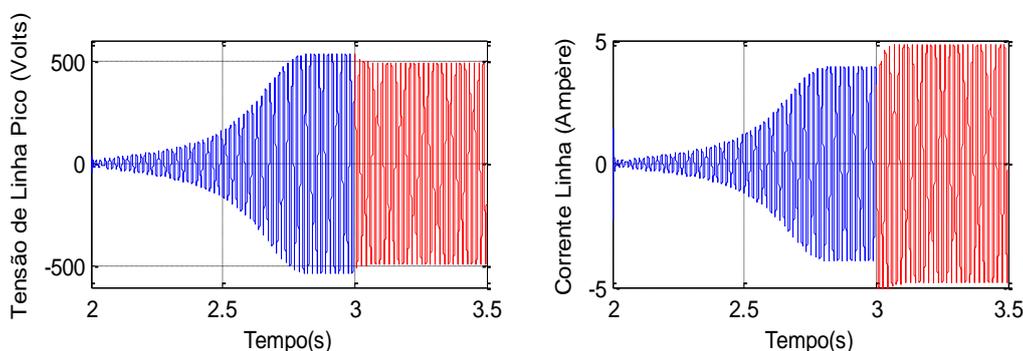


Figura 31 - Gerador com carga $120,3\text{ ohm}$ e C_s $100\mu\text{F}$, tensão na carga de 488V linha pico.

Com isso tem-se um afundamento de tensão ainda maior do que para a capacitância de $50\mu\text{F}$ e em troca vê-se um pequeno aumento da tensão na carga que é insatisfatório para condições de trabalho.

Para melhor analisar os efeitos da regulação de tensão utilizando a capacitância série, a Tabela 1, exibe os valores para tensão na carga, tensão gerada e corrente do gerador. Então, observando as colunas da Tabela 1 tem-se a capacitância fixa e a variação da carga e observa-se a reação do aumento da carga. E, olhando as linhas tem-se a carga fixa e a alteração da capacitância.

Tabela 1 – Parâmetros de operação do gerador para variação da carga e da capacitância.

Carga 361 Ω				
Capacitor (μF)	5,00	20,00	35,00	50,00
Tensão Linha Gerador (V)	563,00	534,00	526,00	523,00
Corrente Gerador (A)	4,50	4,38	4,30	4,15
Tensão Linha Carga (V)	307,00	500,00	515,00	516,00
Carga 180,5 Ω				
Capacitor (μF)	5,00	20,00	35,00	50,00
Tensão Linha Gerador (V)	560,00	552,00	534,00	523,00
Corrente Gerador (A)	4,68	5,15	4,92	4,75
Tensão Linha Carga (V)	178,00	441,00	490,00	500,00
Carga 120,3 Ω				
Capacitor (μF)	5,00	20,00	35,00	50,00
Tensão Linha Gerador (V)	564,00	571,00	550,00	533,00
Corrente Gerador (A)	4,70	5,78	5,72	5,50
Tensão Linha Carga (V)	123,00	377,00	460,00	484,00
Carga 96,26 Ω				
Capacitor (μF)	5,00	20,00	35,00	50,00
Tensão Linha Gerador (V)	565,00	563,00	583,00	545,00
Corrente Gerador (A)	4,74	6,30	6,10	6,10
Tensão Linha Carga (V)	100,00	336,00	435,00	470,00

Então pela análise dos dados apresentados, observa-se que capacitores pequenos em série proporcionam alta impedância em série com a carga. Apesar de elevarem a tensão terminal do gerador, mas são vistos como alta impedância antes da carga o que reduz a tensão na carga. A alta capacitância aumenta a tensão na carga e aumenta a corrente gerada, no entanto, afunda a tensão gerada e não atinge a tensão nominal requerida para operação, 537V linha pico ou 380Vrms de linha. É possível ver que é o capacitor série não fornece reativo suficiente para o gerador operar com alta carga.

4 Conclusões

Este trabalho proporcionou um grande estudo a respeito da máquina de indução trifásica, desde aspectos construtivos até formas de operação, como motor e gerador. Analisando diferenças entre essas formas de operação como fluxo de potência e características necessárias a uma e dispensáveis a outra. Como é o caso da resistência do rotor que deve ser considerável para o motor, para ter torque de partida, mas não é necessária para o gerador, com a finalidade reduzir as perdas. Além de pesquisar e comparar algumas formas de modelagem, com a utilizada, que considera a saturação magnética do gerador, diferentemente das comumente utilizadas.

Foi visto que para a máquina de indução trabalha como gerador autoexcitado é necessário utilizar capacitores em paralelo com as fases da máquina. Esses capacitores alteram a fase das correntes do estator, provocando uma reação de armadura que faz o fluxo magnético aumentar. Assim, gerar tensão alternada, porém somente fornece potência ativa para carga, carga essa que reduz a autoexcitação do gerador ao ser elevada. Sendo necessário a regulação de tensão do gerador, que no momento apresenta-se insatisfatória, mas que futuramente pode vir a ser melhor, ao se realizar mais estudos.

Conclui-se a partir dos resultados obtidos com o modelo matemático estudado, a respeito do gerador de indução trifásico auto excitado. Que a regulação de tensão com capacitor em série exige um alto valor de capacitância para bons resultados, de tensão nominal na carga. Pois, a queda de tensão no capacitor é muito significativa para cargas elevadas e para pequenas capacitância, e assim, podem saturar o gerador diminuindo sua vida útil. Viu-se que a ligação em série de capacitores é satisfatória quando a carga é baixa, desde que o capacitor em série seja maior que o capacitor em paralelo, utilizado para autoexcitação do gerador.

O gerador de indução tem o potencial para entrar no mercado, e gerar energia com baixo custo para pequenas centrais e para pequenos geradores, que queiram aderir à geração distribuída do Brasil, que sendo implementada recentemente, mas para isso é preciso melhor o desempenho da regulação de tensão, do gerador de indução trifásico autoexcitado.

Para trabalhos futuros recomenda-se tentar acrescentar o inversor de frequência nos terminais do gerador, para melhor ajuste de tensão e acrescentar um método de controle da tensão para esta modelagem do gerador compensado com capacitores em série.

Referências Bibliográficas

MARRA, E.G. & POMILIO J.A. “Sistemas De Geração Baseados Em Gerador De Indução Operando Com Tensão Regulada E Freqüência Constante”.

RESENDE, José Tarcísio; “O Gerador De Indução Como Uma Alternativa De Geração de Energia Elétrica “– EFEI/ 1994.

JÚNIOR, Júlio Vítor Kunzler. “Análise Teórica E Experimental Do Gerador Assíncrono De Dupla Alimentação – O Gead, E Contribuição À Sua Operação” – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2006.

TRAPP, Jordan Gustavo (2009). “Gerador De Indução Isolado Com Tensão E Freqüência Reguladas Por Conversor Matricial Esparso”- Universidade Federal de Santa Maria – 2009.

PINHEIRO, David Guedes (2007). “Modelagem Matemática Do Gerador De Indução Trifásico, Incluindo A Saturação Magnética E O Controle Da Tensão Gerada” – Universidade Federal de Viçosa – 2007.

CHAPALLAZ, J.M. et al. “Manual On Induction Motors Used As Generators. Braunschweig: Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien-Gate”, 1992. (Mhpg series harnessing water power in a small scale; v.10).

DIAS, Pedro Henrique Falqueto (2012). “Simulação Do Gerador De Indução Trifásico Auto-Excitado Por Meio De Capacitores” – Universidade Federal de Viçosa – 2012.

HOMRICH, Guilherme (2013). “Regulação De Tensão Em Geradores De Indução”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2013.

VALADÃO, Renato Augusto Derze (2012). “Análise Do Comportamento De Um Gerador De Indução Trifásico Autoexcitado Por Capacitores” – Universidade Federal do Rio de Janeiro – 2012.

KUPERMAN, A; RABINOVICI, R.. “Shunt voltage regulators for autonomous induction generators. Part I: principles of operation. IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems”. 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9627/30421/01399669.pdf>>. Acesso em: 31 Maio 2007.

RESENDE, José Tarcísio; “Modelagem Da Máquina De Indução Trifásica Incluindo A Saturação Magnética – Análise Dinâmica Do Gerador De Indução Auto-Excitado”. Uberlândia, 1999. 172f.. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia.

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.