



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO

**SISTEMA DE GERAÇÃO COM MÁQUINA A IMÃ PERMANENTE
HEXAFÁSICA UTILIZANDO MICROTURBINA A GÁS**

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2012

VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO

SISTEMA DE GERAÇÃO COM MÁQUINA A IMÃ PERMANENTE
HEXAFÁSICA UTILIZANDO MICROTURBINA A GÁS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas

Orientador:

Professor Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing.

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2012

VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO

**SISTEMA DE GERAÇÃO COM MÁQUINA A IMÃ PERMANENTE
HEXAFÁSICA UTILIZANDO MICROTURBINA A GÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família e à minha
linda namorada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e sobretudo a Deus pelo dom da vida e por ter me dado forças ao longo de todo o caminho que atravessei na universidade.

Agradeço aos meus pais, Antônio e Maria do Carmo, aos meus irmãos, Arthur e Daniel, e à minha namorada, Brenda, pelo apoio incondicional e pelo constante incentivo.

Agradeço também a Universidade Federal de Campina Grande, em especial Departamento de Engenharia Elétrica pela inestimável oportunidade de realizar esse projeto em seu privilegiado meio.

Ao Programa de Recursos Humanos (PRH-42) da Agência Nacional do Petróleo pelo financiamento do projeto e ao professor Mauricio B. R. Côrrea pela oportunidade de participar desse grande e prestigiado programa.

Ao professor Cursino Jacobina pelos ensinamentos e imprescindível ajuda para realização do projeto.

Aos amigos Alysson, Tony, Álvaro e Gregory pela grande ajuda e pelas conversas esclarecedoras para o meu avanço.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização do trabalho,
OBRIGADO POR TUDO.

RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos e comparações entre topologias de conversores de potência quando utilizados para fazer o acoplamento entre a geração, representada por um gerador a imã permanente, e uma carga elétrica a ser alimentada. A fonte primária de energia para o sistema é uma microturbina a gás que, devido ao fato de ser uma fonte controlada, permite fornecer a energia solicitada pela carga. O sistema de controle consiste em controladores da corrente na máquina elétrica, da velocidade de giro do seu eixo e da tensão no barramento dos conversores. O modelo da máquina a imã permanente é obtido e suas equações são utilizadas nas simulações realizadas em ambiente MatLab. Os resultados de simulação são mostrados e discutidos.

Palavras-chave: Conversores de potência, máquina a imã permanente, geração, microturbina a gás.

ABSTRACT

This work presents studies and comparisons between power converter topologies used for coupling the generation, represented by a permanent magnet generator, and an electric charge. The primary energy source of the system is a gas microturbine. Due to the fact that it is a controlled source, the microturbine assures the supply of the energy demanded by the charge. The control system consists in current controllers in the machine, speed controller in its axis and a converter DC-link voltage controller. The machine's model is determined and its equations are used in the simulations performed in MatLab environment. Simulation results are shown and discussed.

Key words: Power Converters, permanent magnet machine, generation, gas microturbine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de um sistema de geração com microturbina a gás [3]. | 11 |
| Figura 2. Sistema de geração trifásico convencional. | 13 |
| Figura 3. Chave IGBT ligada em antiparalelo com um diodo. | 14 |
| Figura 4. Comparação da tensão de polo de referência v_{10}^* e a portadora triangular v_{1l} . | 15 |
| Figura 5. Representação de uma bobina com tensão, corrente e fluxo. | 18 |
| Figura 6(a). Sistema de controle da geração (topologia convencional). | 21 |
| Figura 6(b). Sistema de controle da carga. | 21 |
| Figura 7. Diagrama de controle da velocidade. | 22 |
| Figura 8. Diagrama completo do sistema de controle para topologia convencional. | 23 |
| Figura 9. Topologia proposta. | 24 |
| Figura 10. Transformada dq hexafásica[6]. | 30 |
| Figura 11. Sistema de controle da geração (topologia proposta). | 32 |
| Figura 12. Diagrama do controle individual do barramento 1. | 32 |
| Figura 13. Diagrama completo do sistema de controle para topologia proposta. | 32 |
| Figura 14. Corrente no estator da máquina. | 34 |
| Figura 15. Correntes na carga. | 34 |
| Figura 16. Velocidade mecânica do rotor. | 34 |
| Figura 17. Tensão no barramento. | 35 |
| Figura 18. Tensão chaveada na geração. | 35 |
| Figura 19. Tensão chaveada na carga. | 35 |
| Figura 20. Correntes nas fases ímpares do gerador. | 37 |
| Figura 21. Correntes nas fases pares do gerador. | 38 |
| Figura 22. Velocidade mecânica do rotor – topologia proposta. | 38 |
| Figura 23. Valor médio das tensões sobre os capacitores. | 38 |
| Figura 24. Tensão no barramento 1. | 39 |
| Figura 25. Tensão no barramento 2. | 39 |
| Figura 26. Tensão no barramento 3. | 39 |
| Figura 27. Tensão no barramento 4. | 40 |
| Figura 28. Tensão no barramento 5. | 40 |
| Figura 29. Tensão no barramento 6. | 40 |
| Figura 30. Tensão chaveada – fase 1 da geração. | 41 |
| Figura 31. Tensão chaveada – fase 1 da carga. | 41 |

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vi |
| Abstract | vii |
| Lista de Ilustrações | viii |
| Sumário | ix |
| 1 Introdução | 10 |
| 2 Topologia convencional | 13 |
| 2.1 Conversores e estratégia PWM | 14 |
| 2.2 Máquina a imã permanente | 17 |
| 2.2.1 Modelo Matemático | 17 |
| 2.3 Sistema de controle | 20 |
| 3 Topologia proposta – Geração hexafásica e carga trifásica | 24 |
| 3.1 Estratégia PWM | 25 |
| 3.2 Máquina a imã permanente hexafásica | 29 |
| 3.2.1 Modelo Matemático | 30 |
| 3.3 Sistema de controle | 31 |
| 4 Resultados de simulação | 33 |
| 4.1 Resultados – Topologia convencional | 33 |
| 4.2 Resultados – Topologia proposta | 36 |
| 5 Conclusão | 42 |
| Bibliografia | 43 |

1 INTRODUÇÃO

Atualmente passe-se por um processo de mudança, em escala global, do modo de pensar, agir e produzir. Agora todas as nações se preocupam em produzir e crescer de forma mais sustentável, ou seja, agredindo menos o meio ambiente. Nesse contexto, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias tanto de geração quanto de utilização da energia de forma a causar cada vez menos impacto ambiental e com maior eficiência energética.

O desenvolvimento do projeto de um “Sistema de Geração com Microturbinas a Gás” se dá como parte dessa nova tendência global e nacional, e um novo tipo de geração surge, a chamada *Geração Distribuída* (GD). Esse tipo de geração apresenta como objetivo o abastecimento energético de, por exemplo, uma comunidade pequena, mercados locais ou regionais, sem a necessidade de acessar o sistema de transmissão.

Os sistemas GD se caracterizam pela baixa potência de geração e pela utilização de fontes renováveis de energia e baixa emissão de poluentes. Dentre as tecnologias utilizadas em GD, além da microturbina a gás, estão as centrais eólicas e painéis fotovoltaicos[1][2].

No caso do setor de produção de petróleo e gás, as microturbinas tendem a substituir os motores a diesel como a fonte primária que fornece energia para a realização dos processos de perfuração de poços e elevação do petróleo e do gás em sondas e plataformas *offshore*, bem como *onshore* quando localizadas em locais remotos e afastados da rede elétrica. Dessa maneira, é obtida uma redução na emissão de dióxido de carbono, já que o gás natural utilizado produz menos poluentes quando de sua combustão quando comparado ao óleo diesel, além de obter-se uma maior eficiência energética, já que o gás extraído do reservatório é usado diretamente para a geração da energia necessária, contrariamente ao óleo diesel, que é resultado do processo de refino do petróleo.

Entretanto, o uso de microturbinas a gás em um sistema de geração de energia elétrica tem como característica a obtenção de tensões elétricas de alta frequência decorrentes da alta velocidade de giro do eixo da microturbina, velocidade esta que pode chegar a 1kHz [3]. Dessa forma, é necessária a utilização de dispositivos de

eletrônica de potência chamados de *conversores* que têm o papel de acoplar o sistema de geração à rede elétrica ou à carga, que apresentam geralmente 60 Hz como frequência fundamental, garantindo assim que toda a potência gerada seja consumida pela carga.

A importância do uso da eletrônica de potência em um sistema de geração, além de garantir o controle do fluxo de potência no sentido geração-carga, se dá também por outros fatores como:

- Ausência do redutor de velocidade, já que a redução da alta frequência de geração à baixa frequência da rede é realizada pelo próprio conversor;
- Ausência de um motor de partida, já que a energia necessária para a partida da turbina é fornecida pelo barramento CC do conversor;
- Permite geração à velocidade variável, dando maior flexibilidade ao sistema;

Dessa forma, vemos que a utilização da eletrônica de potência representa uma grande economia no que diz respeito ao transporte, instalação e manutenção dos equipamentos necessários para geração de energia elétrica, além de garantir maior flexibilidade ao sistema, permitindo a operação da turbina e do gerador de maneira otimizada.

Entretanto, a maioria dos conversores utilizados não é projetada para converter altas frequências, ocasionando distorções nas tensões e correntes, além de um aumento na potência dissipada. Também devido à alta frequência da geração, a escolha do gerador e das características dos controladores de tensão, corrente e velocidade presentes no sistema merecem particular atenção.

Em seguida a figura 1 representa, de forma sucinta, o sistema de geração com microturbina a gás.

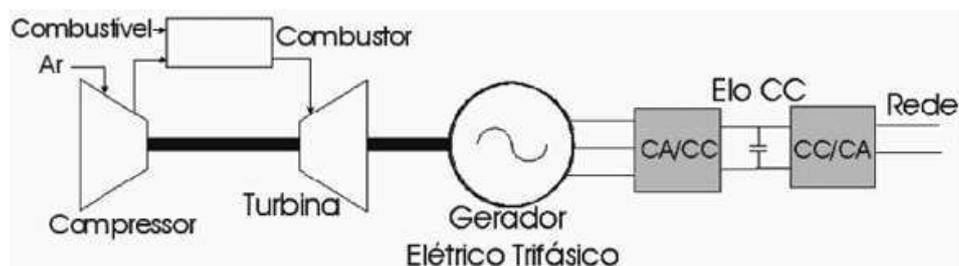


Figura 1. Esquema de um sistema de geração com microturbina a gás [3].

O ar que entra no compressor é comprimido e atinge altas pressões e temperaturas. Ele é então lançado dentro do combustor junto com o combustível (gás natural) e os gases resultantes da combustão são lançados na turbina, que se expandem e empurram suas pás, fazendo o eixo a ela acoplado girar. Este, também acoplado ao gerador elétrico trifásico, permite a conversão da energia mecânica do eixo em energia elétrica, que tem como destino final a rede ou a carga, tendo seu fluxo de potência controlado pelo conversor CA-CC-CA[3].

Neste trabalho serão discutidos duas topologias para o acoplamento entre geração e carga. Uma utilizando um gerador trifásico e outra utilizando um gerador hexafásico. Porém ambos são máquinas a imã permanente.

Em seguida passa-se ao detalhamento dos elementos que compõem o sistema de geração, sendo eles a máquina a imã permanente e o conversor de potência, introduzindo o conceito e a descrição do funcionamento da estratégia de modulação por largura de pulso, conhecido como *PWM (Pulse Width Modulation, do inglês)*.

2 TOPOLOGIA CONVENCIONAL

A figura 2 ilustra o circuito elétrico que representa um sistema de geração trifásico convencional:

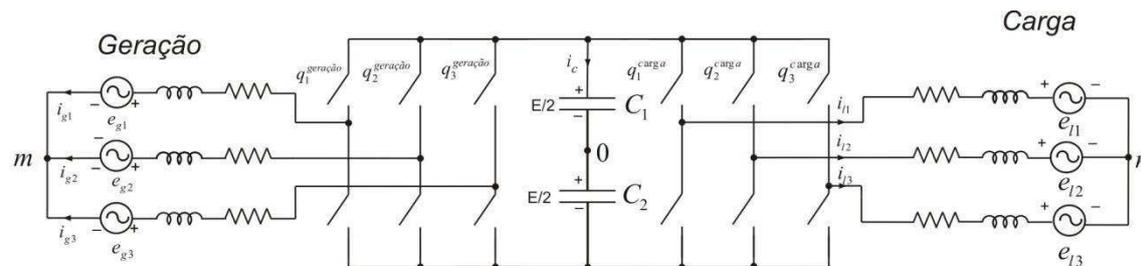


Figura 2. Sistema de geração trifásico convencional.

A esquerda tem-se o circuito do gerador trifásico, representado por fontes de tensão senoidais em série com uma resistência e uma indutância. É a ele que a turbina é acoplada. Ao centro da figura tem-se o conversor CA-CC-CA, representado por chaves e um barramento capacitivo. Ele pode ser dividido em duas partes. A primeira, que converte a tensão e a corrente alternadas (CA) da geração em tensão e corrente contínuas (CC) no barramento, é chamada de retificador ou conversor CA-CC. Já a segunda converte a tensão e a corrente contínuas do barramento em tensão e corrente alternadas na carga, é chamada de inversor ou conversor CC-CA.

O controle do fluxo de potência se dá pela abertura e o fechamento das chaves do conversor e o instante em que este chaveamento acontece é determinado pela estratégia PWM.

Por fim, à direita, tem-se o circuito da carga, também representado por fontes de tensão senoidais em série com uma resistência e uma indutância.

O sistema de controle (não mostrado na figura) garante que o fluxo de potência aconteça da maneira desejada ou de acordo com a demanda da carga, atuando de forma direta no PWM do conversor e, conseqüentemente, na determinação dos instantes de chaveamento, o qual será discutido posteriormente.

2.1 CONVERSORES E ESTRATÉGIA PWM

Os conversores são compostos por dispositivos semicondutores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, em inglês) que, ligadas em antiparalelo com diodos, permitem condução bidirecional de corrente. O sentido da corrente na chave bem como a tensão sobre ela depende do seu estado (aberto ou fechado). Os instantes de chaveamento nos quais as chaves abrem ou fecham são determinados utilizando a técnica PWM. A figura 3 ilustra a representação de uma chave IGBT bidirecional em corrente.

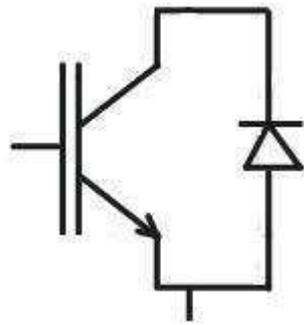


Figura 3. Chave IGBT ligada em antiparalelo com um diodo.

A técnica consiste na comparação das tensões de pólo de referência, que são os valores desejados para a diferença entre as tensões nos centros de cada braço do conversor e a tensão no centro do barramento (por exemplo, a tensão no centro de um braço é v_1 e a tensão no centro do barramento é v_0 , assim a tensão de pólo será $v_{10} = v_1 - v_0$) com uma portadora triangular que oscila a uma frequência de 10kHz. Dessa maneira, serão obtidas tensões chaveadas na entrada e na saída do conversor.

A figura 4 ilustra como acontece o chaveamento da chave IGBT através da estratégia PWM.

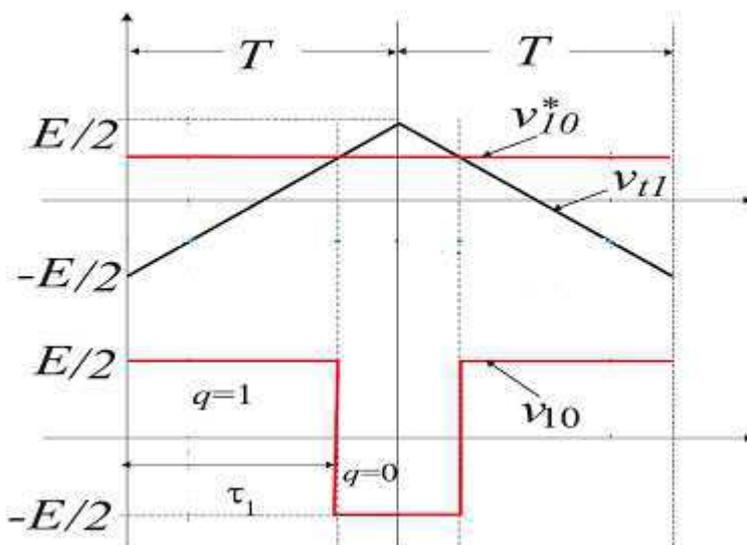


Figura 4. Comparação da tensão de polo de referência v_{10}^* e a portadora triangular v_{t1} .

Na figura 4 é ilustrado como se dá o chaveamento em uma das três fases, seja ela da carga ou da geração, durante um período da onda triangular, chamado também de período de chaveamento. Sabendo que a frequência de oscilação da portadora é de $f_s = 10 \text{ kHz}$, logo seu período é $T_s = 1/f_s = 10^{-4} \text{ s}$. Então, durante esse período, a tensão de pólo de referência v_{10}^* , que tem como frequência fundamental 60 Hz , pode ser considerada constante, já que sua frequência de oscilação é muito menor que a da portadora.

Então, para o período de tempo τ_1 para o qual v_{10}^* é maior que a triangular v_{t1} , $v_{10}^* > v_{t1}$, a chave superior do braço está fechada ($q=1$) e a inferior aberta e a tensão de pólo instantânea v_{10}^* é $E/2$ (nível alto), onde E é a tensão no barramento. Já para o período de tempo para o qual $v_{10}^* < v_{t1}$, a chave superior está aberta ($q=0$) e a inferior fechada e a tensão de pólo instantânea é $-E/2$ (nível baixo). A segunda metade do período apresenta comportamento simétrico à primeira metade. Nota-se que as duas chaves de um mesmo braço trabalham de forma complementar, ou seja, quando uma fecha a outra abre e vice-versa, de maneira a nunca curto-circuitar o capacitor. A estratégia consiste em que, para cada período de chaveamento, o valor médio da tensão de pólo instantânea seja igual à tensão de pólo de referência. O mesmo processo acontece para as outras duas fases. Assim, as equações para as tensões de pólo na entrada e na saída do conversor CA-CC-CA da figura 2 são:

$$v_{10}^{\text{geração}} = (2q_1^{\text{geração}} - 1) \frac{E}{2} \quad (2.1)$$

$$v_{20}^{geração} = (2q_2^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (2.2)$$

$$v_{30}^{geração} = (2q_3^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (2.3)$$

$$v_{10}^{carga} = (2q_1^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (2.4)$$

$$v_{20}^{carga} = (2q_2^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (2.5)$$

$$v_{30}^{carga} = (2q_3^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (2.6)$$

Nota-se a ligação entre as fases da carga é a denominada de ligação “Y”. O ponto de ligação é denominado neutro e chamado n na figura 2. Sabe-se que há uma tensão entre esse ponto e o centro do barramento (ponto 0), sendo a tensão v_{n0} , chamada de tensão homopolar.

Como será mostrado adiante, as tensões de referência sobre as três fases da carga, denominadas v_{1carga}^* , v_{2carga}^* e v_{3carga}^* , são determinadas pelo sistema de controle e é a partir dessas tensões e da tensão homopolar de referência, v_{n0}^* , que serão determinadas as tensões de pólo de referência que serão utilizadas para realização do PWM.

A tensão v_{n0}^* deve ser tal que os limites máximo ($E^*/2$) e mínimo ($-E^*/2$) das tensões de pólo sejam respeitados. Assim:

$$v_{n0max}^* = \frac{E^*}{2} - v_{1max}^* \quad (2.7)$$

$$v_{n0min}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{1min}^* \quad (2.8)$$

Onde $v_{1max}^* = \max(V1)$, $v_{1min}^* = \min(V1)$ e $V1 = (v_{1carga}^*, v_{2carga}^*, v_{3carga}^*)$.

É então definido o fator de roda livre que pode variar entre 0 e 1. Dependendo do seu valor, as distorções harmônicas da tensão sobre a carga podem ser diminuídas com conseqüente redução do seu WTHD e diminuição do THD das correntes. Assim, a tensão homopolar de referência é dada por:

$$v_{n0}^* = \mu v_{n0max}^* + (1 - \mu) v_{n0min}^* \quad (2.9)$$

Por fim, as tensões de pólo de referência no conversor CC-CA são:

$$v_{10carga}^* = v_{1carga}^* + v_{n0}^* \quad (2.10)$$

$$v_{20carga}^* = v_{2carga}^* + v_{n0}^* \quad (2.11)$$

$$v_{30carga}^* = v_{3carga}^* + v_{n0}^* \quad (2.12)$$

Da mesma maneira para a geração, sendo o ponto de ligação das fases denominado m :

$$v_{10ger}^* = v_{1ger}^* + v_{m0}^* \quad (2.13)$$

$$v_{20ger}^* = v_{2ger}^* + v_{m0}^* \quad (2.14)$$

$$v_{30ger}^* = v_{3ger}^* + v_{m0}^* \quad (2.15)$$

2.2 MÁQUINA A IMÃ PERMANENTE

A máquina a imã permanente é denominada como síncrona, já que a velocidade do campo girante induzido em seu interior é igual à frequência das grandezas elétricas do estator. É também uma máquina alternada, já que tensões e correntes mudam de polaridade ao longo do tempo, apresentando ora valores positivos ora valores negativos.

Essa máquina surgiu da substituição dos enrolamentos do rotor por um imã permanente. Assim, possibilitou-se uma redução das perdas, antes presentes por efeito Joule nos enrolamentos.

A máquina a imã é constituída de três enrolamentos trifásicos no estator, formando uma armadura semelhante à máquina assíncrona trifásica, e de um rotor a imã permanente [4].

As forças eletromotrizes resultantes do giro do imã induzem tensões senoidais nos enrolamentos do estator da máquina. São essas tensões que serão retificadas pelo conversor CA-CC.

2.2.1 MODELO MATEMÁTICO

A modelagem deve ser feita considerando certas simplificações e aproximações, como mostrado em [4]:

- Não é considerada a saturação do circuito magnético;

- O material magnético permanente tem uma curva de desmagnetização linear e independente da temperatura;
- O fluxo dos ímãs do rotor e dos enrolamentos do estator são senoidais, dessa forma, a força eletromotriz induzida é senoidal;
- As perdas por histerese e as perdas produzidas pelas correntes parasitas são desprezíveis;
- Admite-se que as resistências e indutâncias da máquina são independentes da temperatura e da frequência;
- O enrolamento trifásico do estator é distribuído de forma senoidal. O enrolamento é conectado em estrela, logo não existe a componente de sequência zero da corrente;
- O rotor não tem gaiola-de-esquilo.

Seguindo a lei de Faraday, uma variação do fluxo magnético em uma bobina induz uma tensão em seus terminais. Assim, considerando a convenção receptora para a máquina tem-se que, como mostrado em [5]:

$$v = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.16)$$

Onde R é a resistência da bobina, i a corrente que a percorre e λ o fluxo que a atravessa, como ilustrado na figura 5.

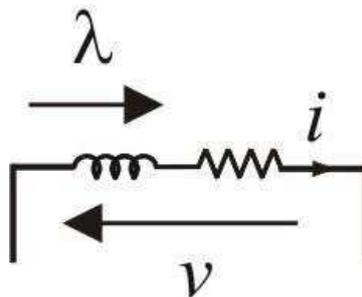


Figura 5. Representação de uma bobina com tensão, corrente e fluxo.

Para uma máquina trifásica pode-se escrever um termos matriciais:

$$v_{123} = Ri_{123} + \frac{d\lambda_{s123}}{dt} \quad (2.17)$$

Onde $v_{123} = [v_1 v_2 v_3]^T$, $i_{123} = [i_1 i_2 i_3]^T$ e $\lambda_{s123} = [\lambda_{s1} \lambda_{s2} \lambda_{s3}]^T$.

Como mostrado em detalhes em [4], as indutâncias por fase podem ser divididas em duas partes. Uma referente à indutância própria e outra referente à indutância mútua. As duas componentes dependem do ângulo elétrico do rotor. Assim:

$$\lambda_{S123} = L_{SS}i_{123} + \lambda_{R123} \quad (2.18)$$

Onde L_{SS} é a matriz das indutâncias próprias e mútuas das três fases do estator e

$$\lambda_{R123} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \lambda_m$$

é a distribuição de fluxo produzido pelo imã permanente do

rotor. λ_m é o valor da amplitude do fluxo produzido pelo imã que enlaça os enrolamentos do estator.

Logo, as tensões estatóricas se tornam:

$$v_{S123} = Ri_{S123} + L_{SS} \frac{di_{S123}}{dt} + \omega_R \frac{dL_{SS}}{d\theta_R} i_{S123} + \omega_R \frac{d\lambda_{R123}}{d\theta_R} \quad (2.19)$$

Conforme detalhado em [5], é possível representar as máquinas elétricas trifásicas por um modelo mais simples que o trifásico primitivo. Isso pode ser obtido fazendo uma transformação de variáveis denominada *Transformada odq*. As variáveis *odq* podem ser obtidas a partir das variáveis trifásicas por:

$$x_{123} = A_S x_{odq} \quad \Rightarrow \quad x_{odq} = A_S^{-1} x_{123} \quad (2.20)$$

Onde A_S é a matriz de transformação e é dada por:

$$A_S = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - 2\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - 4\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - 4\pi/3) \end{bmatrix}$$

Assim, substituindo a matriz A_S na expressão das tensões estatóricas, o modelo equivalente bifásico *dq* é obtido e dado por:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega_R L_{sq} \\ \omega_R L_{sd} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \omega_R \lambda_{pm} \quad (2.21)$$

Onde $\lambda_{pm} = \sqrt{\frac{3}{2}}\lambda_m$. Vale salientar que o referencial é considerado como sobre o fluxo rotórico, obtendo-se assim as tensões acima.

Por sua vez, o conjugado elétrico desenvolvido pela máquina é dado por:

$$c_e = P[\lambda_{pm}i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq})i_{sd}i_{sq}] \quad (2.22)$$

Onde P é o número de pares de pólos da máquina.

O primeiro termo é proporcional à corrente i_{sq} e independente da corrente i_{sd} . Já o segundo termo é proporcional ao produto $i_{sd}i_{sq}$ e à diferença $L_{sd} - L_{sq}$ e é denominado de torque de relutância. O conjugado elétrico máximo é alcançado quando esse termo de relutância é anulado. Logo, isso é obtido fazendo $i_{sd} = 0$ através do controle dessa componente da corrente, ou seja, $i_{sd}^* = 0$.

Por fim, a equação mecânica da máquina é:

$$J \frac{d}{dt} \omega_m = c_e - c_m - F_m \omega_m \quad (2.23)$$

Onde J é o momento de inércia do sistema, F_m é o coeficiente do atrito e ω_m é a velocidade mecânica do rotor. Ela se relaciona com a frequência elétrica ω_R através da seguinte expressão:

$$\omega_m = \frac{\omega_R}{P} \quad (2.24)$$

Nota-se que, em regime permanente, a derivada da velocidade deve se anular, já que a velocidade deve permanecer constante. Logo, como a máquina funciona como gerador, o conjugado mecânico deve ser maior (em módulo) que o conjugado elétrico, de maneira a vencer o atrito e permitir que o rotor continue girando.

2.3 SISTEMA DE CONTROLE

Os sistemas de controle atuam de maneira a garantir que o fluxo de potência ocorra da maneira desejada e que toda a potência gerada seja consumida pela carga, a menos das perdas. Para que isso ocorra, a tensão no barramento deve permanecer constante e isso é assegurado utilizando-se um controlador de tensão no barramento. Juntamente com os controladores de corrente na carga e na geração e o controlador da

O erro negativo na entrada do controlador de tensão no barramento, dado por $e = -(E^* - E)$, é devido à convenção receptora adotada para a máquina. Assim, se a tensão no barramento estiver menor que a tensão desejada, o erro será negativo, fazendo a máquina desenvolver um conjugado elétrico de referência mais negativo, caracterizando a máquina como um gerador.

Como discutido na seção acima, a corrente $i_{sd}^* = 0$, logo:

$$c_e^* = P\lambda_{pm}i_{sq}^* \quad \Rightarrow \quad i_{sq}^* = \frac{c_e^*}{P\lambda_{pm}} \quad (2.25)$$

É feita então a transformada odq e as correntes de referência fases são obtidas, como ilustrado na figura 6(a).

O controle de velocidade se faz necessário para assegurar que a potência mecânica seja fornecida ao eixo do gerador. A figura 7 ilustra esse controlador.

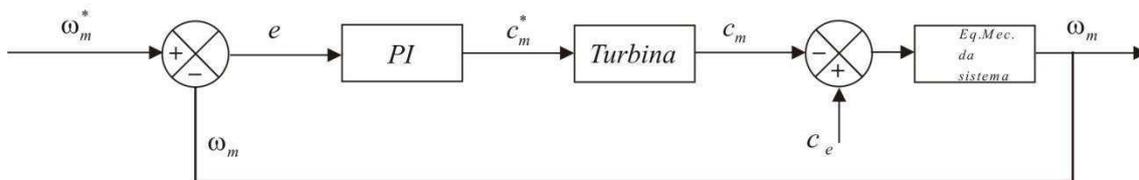


Figura 7. Diagrama de controle da velocidade.

Quando do aumento da demanda da carga elétrica, a máquina tem uma redução de sua velocidade. Então a diferença entre a velocidade desejada (referência) ω_m^* e sua velocidade instantânea, medida através de um sensor de velocidade, passa pelo controlador PI e apresenta em sua saída o conjugado mecânico de referencia c_m^* . O valor deste representa o conjugado necessário para suprir a necessidade da carga elétrica. Quando esse valor é atingido, a velocidade volta a seu valor de referência. Sabe-se que o modelo simplificado da turbina consiste uma função de transferência do tipo:

$$H_T(s) = \frac{1}{T_p s + 1}$$

Onde T_p é o a constante de tempo da turbina.

Assim, o bloco da turbina representa simplesmente um atraso na aplicação desse conjugado sobre o eixo. Em sua saída obtém-se conjugado mecânico instantâneo c_m , o qual é aplicado no eixo da máquina.

Do mesmo modo que para o controle de tensão no barramento, o erro negativo na entrada do controlador de velocidade para que o conjugado mecânico desenvolvido sobre o eixo da máquina seja negativo, caracterizando seu funcionamento como gerador.

Nota-se que os controladores usados são os do tipo PI. Eles são bastante usados por garantir erro nulo em regime permanente quando bem projetados. O PI modificado, utilizado no controle de corrente, é usado quando a grandeza a ser controlada é de caráter alternado.

Na figura 8 é ilustrado o diagrama de controle completo para a topologia convencional, composto de todos os sistemas anteriormente discutidos.

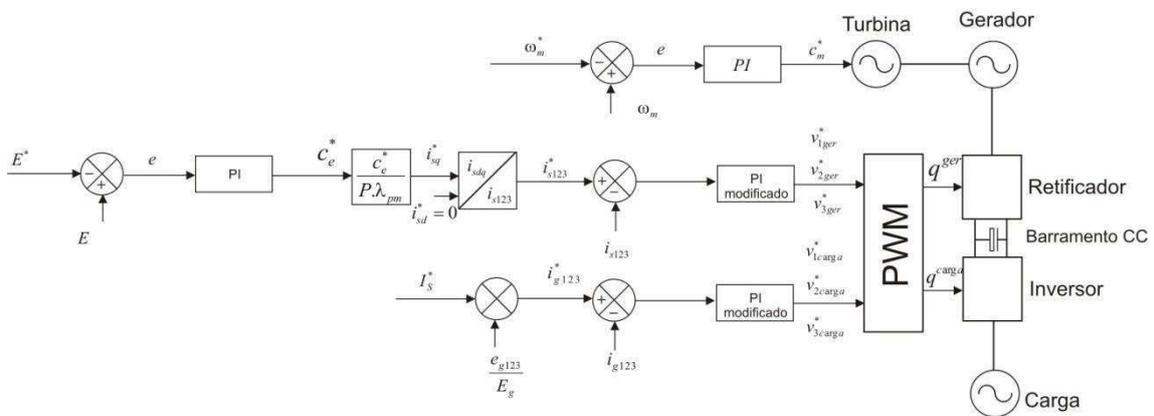


Figura 8. Diagrama completo do sistema de controle para topologia convencional.

3 TOPOLOGIA PROPOSTA – GERAÇÃO

HEXAFÁSICA E CARGA TRIFÁSICA

A figura 9 ilustra a configuração que apresenta em sua geração uma máquina a imã permanente hexafásica.

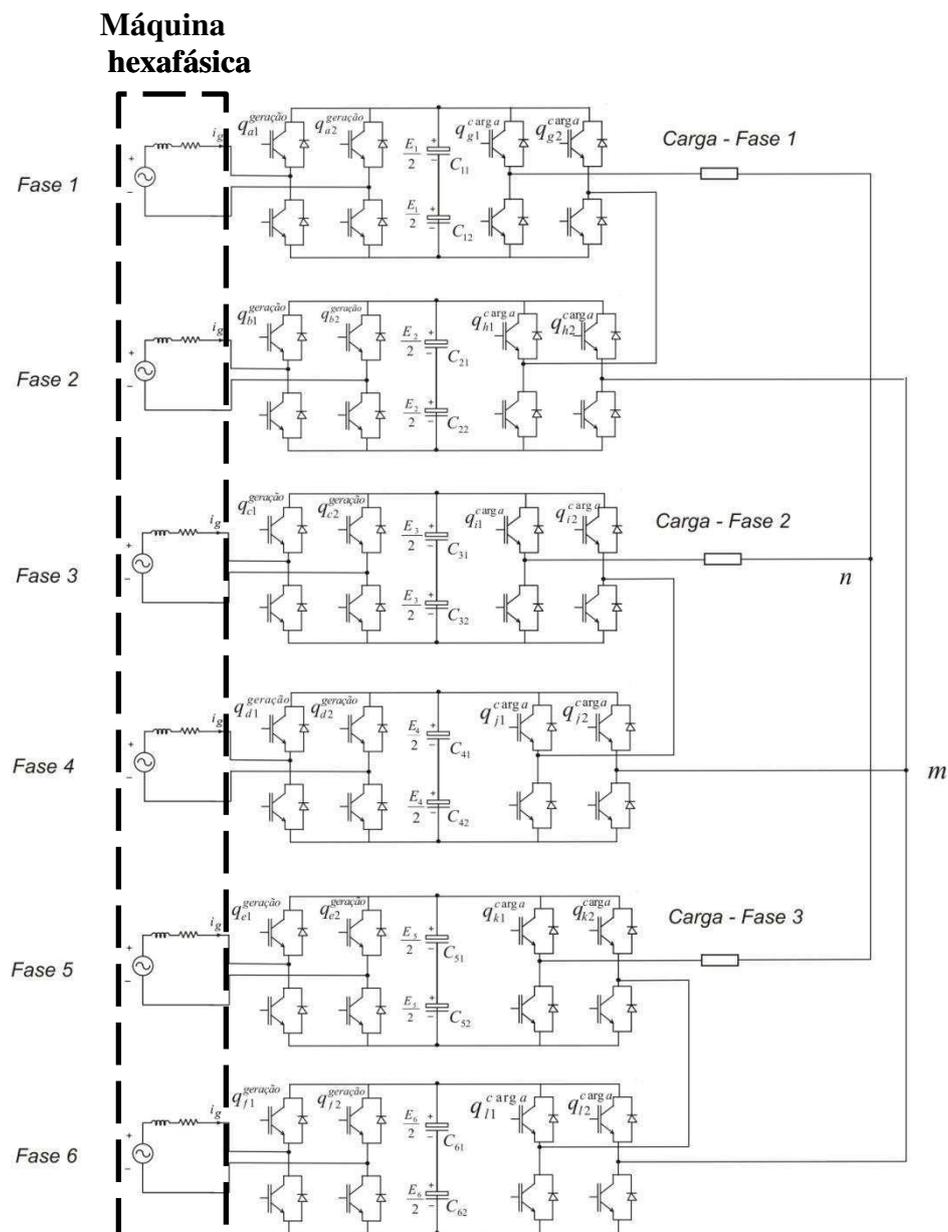


Figura 9. Topologia proposta.

Nota-se que uma ponte H monofásica é responsável por retificar as tensões e correntes em cada fase da máquina. Cada fase alimenta um barramento capacitivo. Para a carga trifásica, pontes H ligadas em série, duas a duas, alimentam cada uma das fases. Essa configuração apresenta redução das componentes harmônicas de tensões e correntes, como será mostrado posteriormente. Em seguida a estratégia PWM para essa configuração será discutida, bem como o modelo da máquina hexafásica.

Como pode ser verificado na figura 9, o nome dos dois capacitores de cada barramento é dado por C_{xy} , onde x representa o barramento, variando de 1 a 6, e y representa se se trata do capacitor superior ou inferior do barramento, sendo 1 quando o capacitor é o superior e 2 quando o capacitor é o inferior.

3.1 ESTRATÉGIA PWM

Da mesma maneira como foi feito para a topologia convencional, as tensões de pólo de referência obtidas para cada conversor serão comparadas com uma portadora triangular. Assim as chaves fecham e abrem de maneira a obter-se as tensões desejadas na entrada e na saída do conversor.

O retificador consiste em seis conversores, apresentando um total de doze braços e, conseqüentemente, doze tensões de pólo, uma para cada braço. O inversor também consiste em seis conversores apresentando um total de doze tensões de pólo. Assim, quando do chaveamento, obtêm-se as seguintes tensões:

$$v_{az0}^{geração} = (2q_{az}^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.1)$$

$$v_{bz0}^{geração} = (2q_{bz}^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.2)$$

$$v_{cz0}^{geração} = (2q_{cz}^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.3)$$

$$v_{dz0}^{geração} = (2q_{dz}^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.4)$$

$$v_{ez0}^{geração} = (2q_{ez}^{geração} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.5)$$

$$v_{fz0}^{gera\tilde{c}ao} = (2q_{fz}^{gera\tilde{c}ao} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.6)$$

$$v_{gz0}^{carga} = (2q_{gz}^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.7)$$

$$v_{hz0}^{carga} = (2q_{hz}^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.8)$$

$$v_{iz0}^{carga} = (2q_{iz}^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.9)$$

$$v_{jz0}^{carga} = (2q_{jz}^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.10)$$

$$v_{kz0}^{carga} = (2q_{kz}^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.11)$$

$$v_{lz0}^{carga} = (2q_{lz}^{carga} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.12)$$

Onde $z=1$ quando a tensão de pólo considerada é relacionada ao braço 1 do conversor ou $z=2$ quando a tensão de pólo considerada é relacionada ao braço 2 do conversor.

As tensões de referência nos retificadores, v_{1ger}^* , v_{2ger}^* , v_{3ger}^* , v_{4ger}^* , v_{5ger}^* e v_{6ger}^* , são determinadas pelos controladores de corrente. Define-se então seis tensões auxiliares da seguinte maneira:

$$v_{amax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{1max}^* \quad (3.13)$$

$$v_{amin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{1min}^* \quad (3.14)$$

$$v_{bmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{2max}^* \quad (3.15)$$

$$v_{bmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{2min}^* \quad (3.16)$$

$$v_{cmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{3max}^* \quad (3.17)$$

$$v_{cmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{3min}^* \quad (3.18)$$

$$v_{dmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{4max}^* \quad (3.19)$$

$$v_{dmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{4min}^* \quad (3.20)$$

$$v_{emax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{5max}^* \quad (3.21)$$

$$v_{emin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{5min}^* \quad (3.22)$$

$$v_{fmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{6max}^* \quad (3.23)$$

$$v_{fmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{6min}^* \quad (3.24)$$

Onde $v_{1max}^* = \max(V1)$, $v_{2max}^* = \max(V2)$, $v_{3max}^* = \max(V3)$, $v_{4max}^* = \max(V4)$, $v_{5max}^* = \max(V5)$ e $v_{6max}^* = \max(V6)$, $v_{1min}^* = \min(V1)$, $v_{2min}^* = \min(V2)$, $v_{3min}^* = \min(V3)$, $v_{4min}^* = \min(V4)$, $v_{5min}^* = \min(V5)$ e $v_{6min}^* = \min(V6)$, $V1 = (v_{1ger}^*, 0)$, $V2 = (v_{2ger}^*, 0)$, $V3 = (v_{3ger}^*, 0)$, $V4 = (v_{4ger}^*, 0)$, $V5 = (v_{5ger}^*, 0)$ e $V6 = (v_{6ger}^*, 0)$. Então:

$$v_a^* = \mu v_{amax}^* + (1 - \mu) v_{amin}^* \quad (3.25)$$

$$v_b^* = \mu v_{bmax}^* + (1 - \mu) v_{bmin}^* \quad (3.26)$$

$$v_c^* = \mu v_{cmax}^* + (1 - \mu) v_{cmin}^* \quad (3.27)$$

$$v_d^* = \mu v_{dmax}^* + (1 - \mu) v_{dmin}^* \quad (3.28)$$

$$v_e^* = \mu v_{emax}^* + (1 - \mu) v_{emin}^* \quad (3.29)$$

$$v_f^* = \mu v_{fmax}^* + (1 - \mu) v_{fmin}^* \quad (3.30)$$

Assim as tensões de pólo de referência utilizadas para o PWM são:

$$v_{a10}^* = v_{1ger}^* + v_a^* \quad (3.31)$$

$$v_{a20}^* = v_a^* \quad (3.31)$$

$$v_{b10}^* = v_{2ger}^* + v_b^* \quad (3.33)$$

$$v_{b20}^* = v_b^* \quad (3.34)$$

$$v_{c10}^* = v_{3ger}^* + v_c^* \quad (3.35)$$

$$v_{c20}^* = v_c^* \quad (3.36)$$

$$v_{d10}^* = v_{4ger}^* + v_d^* \quad (3.37)$$

$$v_{d20}^* = v_d^* \quad (3.38)$$

$$v_{e10}^* = v_{5ger}^* + v_e^* \quad (3.39)$$

$$v_{e20}^* = v_e^* \quad (3.40)$$

$$v_{f10}^* = v_{6ger}^* + v_f^* \quad (3.41)$$

$$v_{f20}^* = v_f^* \quad (3.42)$$

Da mesma maneira para os inversores, as tensões de referência $v_{1carga}^*, v_{2carga}^*, v_{3carga}^*$ são determinadas pelos controladores de corrente. Define-se então seis tensões auxiliares da seguinte maneira:

$$v_{gmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{7max}^* \quad (3.43)$$

$$v_{gmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{7min}^* \quad (3.44)$$

$$v_{hmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{8max}^* \quad (3.45)$$

$$v_{hmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{8min}^* \quad (3.46)$$

$$v_{imax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{9max}^* \quad (3.47)$$

$$v_{imin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{9min}^* \quad (3.48)$$

$$v_{jmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{10max}^* \quad (3.49)$$

$$v_{jmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{10min}^* \quad (3.50)$$

$$v_{kmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{11max}^* \quad (3.51)$$

$$v_{kmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{11min}^* \quad (3.52)$$

$$v_{lmax}^* = \frac{E^*}{2} - v_{12max}^* \quad (3.53)$$

$$v_{lmin}^* = -\frac{E^*}{2} - v_{12min}^* \quad (3.54)$$

Onde $v_{7max}^* = \max(V7)$, $v_{8max}^* = \max(V8)$, $v_{9max}^* = \max(V9)$, $v_{10max}^* = \max(V10)$, $v_{11max}^* = \max(V11)$ e $v_{12max}^* = \max(V12)$, $v_{7min}^* = \min(V7)$, $v_{8min}^* = \min(V8)$, $v_{9min}^* = \min(V9)$, $v_{10min}^* = \min(V10)$, $v_{11min}^* = \min(V11)$ e $v_{12min}^* = \min(V12)$, $V7 = ((0,5 + k_1)v_{1carga}^*, 0)$, $V8 = ((0,5 - k_1)v_{1carga}^*, 0)$, $V9 = ((0,5 + k_1)v_{2carga}^*, 0)$, $V10 = ((0,5 - k_3)v_{2carga}^*, 0)$, $V11 = ((0,5 + k_1)v_{3carga}^*, 0)$ e $V12 = ((0,5 - k_5)v_{3carga}^*, 0)$. Então:

$$v_g^* = \mu v_{gmax}^* + (1 - \mu) v_{gmin}^* \quad (3.55)$$

$$v_h^* = \mu v_{hmax}^* + (1 - \mu) v_{hmin}^* \quad (3.56)$$

$$v_i^* = \mu v_{imax}^* + (1 - \mu) v_{imin}^* \quad (3.57)$$

$$v_j^* = \mu v_{jmax}^* + (1 - \mu) v_{jmin}^* \quad (3.58)$$

$$v_k^* = \mu v_{kmax}^* + (1 - \mu) v_{kmin}^* \quad (3.59)$$

$$v_l^* = \mu v_{lmax}^* + (1 - \mu) v_{lmin}^* \quad (3.60)$$

Assim as tensões de pólo de referência utilizadas para o PWM são:

$$v_{g10}^* = (0,5 + k_1)v_{1carga}^* + v_g^* \quad (3.61)$$

$$v_{g20}^* = v_g^* \quad (3.62)$$

$$v_{h10}^* = (0,5 - k_1)v_{1carga}^* + v_h^* \quad (3.63)$$

$$v_{h20}^* = v_h^* \quad (3.64)$$

$$v_{i10}^* = (0,5 + k_3)v_{2carga}^* + v_i^* \quad (3.65)$$

$$v_{i20}^* = v_i^* \quad (3.66)$$

$$v_{j10}^* = (0,5 - k_3)v_{2carga}^* + v_j^* \quad (3.67)$$

$$v_{j20}^* = v_j^* \quad (3.68)$$

$$v_{k10}^* = (0,5 + k_5)v_{3carga}^* + v_k^* \quad (3.69)$$

$$v_{k20}^* = v_k^* \quad (3.70)$$

$$v_{l10}^* = (0,5 - k_5)v_{3carga}^* + v_l^* \quad (3.71)$$

$$v_{l20}^* = v_l^* \quad (3.72)$$

Onde k_1 , k_3 e k_5 são constantes utilizadas para o balanceamento dos capacitores, como será explicado em detalhes quando falarmos do sistema de controle.

3.2 MAQUINA A IMÃ PERMANENTE HEXAFÁSICA

A máquina a imã permanente de seis fases apresenta as mesmas características e vantagens que a máquina trifásica. Entretanto, é sabido que o aumento do número de fases na geração possibilita a redução do WTHD das tensões do retificador e do THD das correntes que circulam pelas fases da máquina.

3.2.1 MODELO MATEMÁTICO

As mesmas considerações tomadas para modelagem da máquina trifásica devem ser adotadas para a modelagem da máquina hexafásica.

De maneira semelhante ao que foi discutido a respeito da modelagem da máquina trifásica e como descrito em [5], em [6] foi feito o modelamento de uma máquina hexafásica. A mesma transformação de variáveis é utilizada e as variáveis dq se relacionam com as variáveis das fases 1, 2, 3, 4, 5 e 6 através da seguinte expressão:

$$x_{135246} = P_S x_{dqxyoo'} \quad \longrightarrow \quad x_{dqxyoo'} = P_S^{-1} x_{135246} \quad (3.73)$$

Onde P_S é a matriz de transformação e é dada por:

$$P_S = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & -\text{sen}(\theta_R) & \cos(\theta_R) & -\text{sen}(\theta_R) & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ \cos(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ \cos(\theta_R - \alpha) & -\text{sen}(\theta_R - \alpha) & -\cos(\theta_R - \alpha) & \text{sen}(\theta_R - \alpha) & \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3} - \alpha) & -\text{sen}(\theta_R - \frac{2\pi}{3} - \alpha) & -\cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3} - \alpha) & \text{sen}(\theta_R - \frac{2\pi}{3} - \alpha) & \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \\ \cos(\theta_R - \frac{4\pi}{3} - \alpha) & -\text{sen}(\theta_R - \frac{4\pi}{3} - \alpha) & -\cos(\theta_R - \frac{4\pi}{3} - \alpha) & \text{sen}(\theta_R - \frac{4\pi}{3} - \alpha) & \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \end{bmatrix}$$

Onde α é o ângulo de defasagem entre o grupo trifásico ímpar, formado pelas fases 1, 3 e 5, e o grupo trifásico par, formado pelas fases 2, 4 e 6.

Considera-se para a matriz P_S acima que as grandezas hexafásicas são transformadas para o referencial de fluxo rotórico, sendo portanto o ângulo δ_g de [6] substituído por θ_R . A figura 10 ilustra essa transformação:

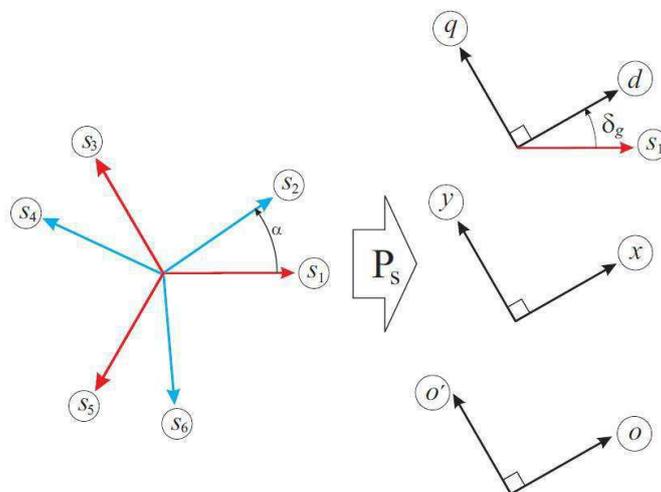


Figura 10. Transformada dq hexafásica[6].

Dessa maneira, as equações para a máquina hexafásica são:

$$v_{sd} = Ri_{sd} - \omega_R L_{sq} i_{sq} + L_{sd} \frac{d}{dt} i_{sd} \quad (3.74)$$

$$v_{sq} = Ri_{sq} + \omega_R L_{sd} i_{sd} + L_{sq} \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_R \lambda_{pm} \quad (3.75)$$

$$v_{sx} = Ri_{sx} - \omega_R L_{ls} i_{sy} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{sx} \quad (3.76)$$

$$v_{sy} = Ri_{sy} + \omega_R L_{ls} i_{sx} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{sy} \quad (3.77)$$

$$v_{so} = Ri_{so} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{so} \quad (3.78)$$

$$v_{so'} = Ri_{so'} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{so'} \quad (3.79)$$

$$c_e = P[\lambda_{pm} i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] \quad (3.80)$$

Onde L_{ls} é a indutância de dispersão do estator.

3.3 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle funciona exatamente da mesma maneira que para a topologia convencional. Entretanto, como foi expressado anteriormente, a topologia proposta apresenta seis barramentos capacitivos e eles devem ser controlados individualmente, além de existir um controle para a média das tensões nos barramentos. Na saída do controlador que controla a média obtém-se o valor do conjugado elétrico de referência e posteriormente as correntes em cada fase, utilizando a transformada dq , conforme ilustrado na figura 10.

Porém controla-se individualmente as tensões dos capacitores das fases 1, 3 e 5. Na saída dos controladores obtêm-se valores k_1 , k_3 e k_5 que são utilizados para balancear as tensões entre as duas pontes H que alimentam a mesma fase da carga. Em regime permanente espera-se que esse balanço resulte na divisão da tensão total igualmente entre as duas pontes H que alimentam a mesma fase. Esse controle individual dos barramentos é ilustrado na figura 11.

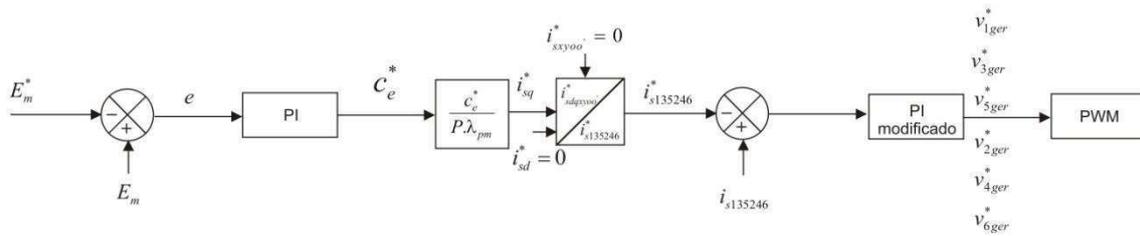


Figura 11. Sistema de controle da geração (topologia proposta).

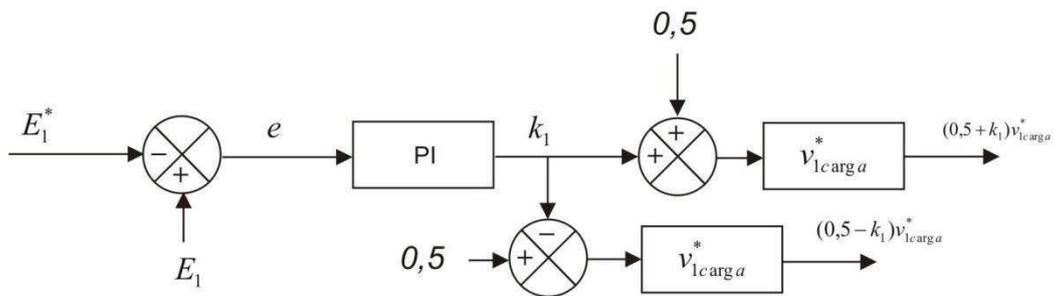


Figura 12. Diagrama do controle individual do barramento 1.

A saída dos diagramas, dadas por $(0,5 + k_1)v_{1carga}^*$ e $(0,5 - k_1)v_{1carga}^*$, são as tensões de referência em cada uma das pontes H que invertem a tensão e alimentam a fase 1 da carga. Como se sabe que a tensão total sobre a fase deve estar dividida igualmente entre as duas pontes H, foi utilizado fator de 0,5 para multiplicar a tensão v_{1carga}^* . Assim, percebe-se que foi utilizada a técnica chamada de “feed-forward” e o controlador deve fornecer um valor próximo de zero para k_1 , utilizado somente para corrigir pequenos erros e balancear os capacitores. O mesmo é realizado para os barramentos 3 e 5, gerando as constantes k_3 e k_5 .

Na figura 13 é ilustrado o diagrama de controle completo para a topologia proposta, composto de todos os sistemas anteriormente discutidos.

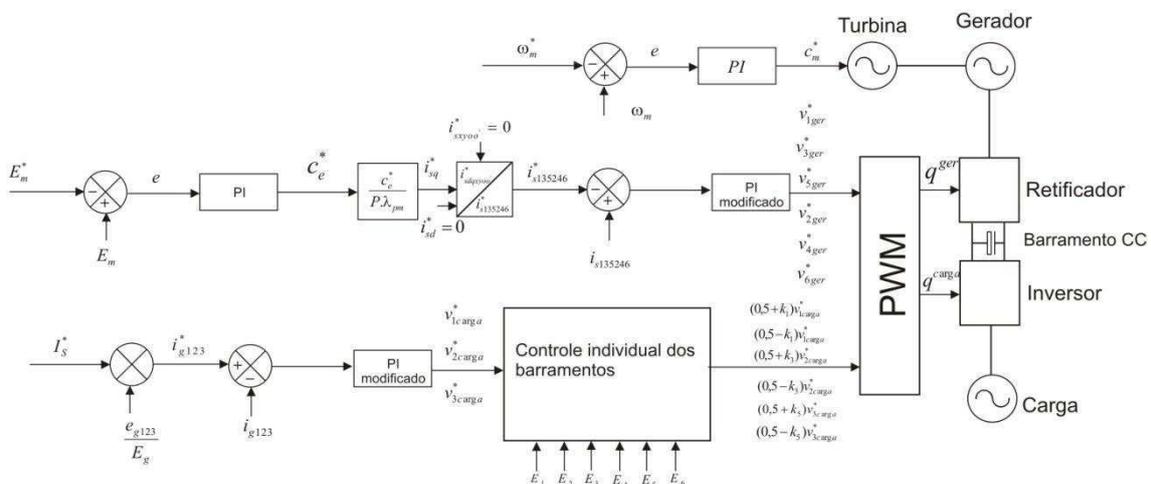


Figura 13. Diagrama completo do sistema de controle para topologia proposta.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Foram realizadas simulações das topologias convencional e proposta. Em seguida os resultados obtidos serão mostrados e discutidos.

4.1 RESULTADOS – TOPOLOGIA CONVENCIONAL

A tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros da máquina a imã permanente usada na simulação e da carga elétrica. Salienta-se que a carga simulada foi uma carga *RL*.

Tabela 1. Parâmetros de simulação – topologia convencional

| Parâmetro | Definição | Valor |
|------------------|---|--|
| P | Número de pares de pólos da máquina | 4 |
| L_d | Componente da indutância estatórica no eixo direto | $24 \times 10^{-3} \text{ H}$ |
| L_q | Componente da indutância estatórica no eixo em quadratura | $33 \times 10^{-3} \text{ H}$ |
| R_S | Resistência estatórica | $6,187 \Omega$ |
| J_m | Momento de Inércia da máquina | $0,084 \times 10^{-1} \text{ kg.m}^2$ |
| F_m | Coefficiente de atrito | $5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2/\text{s}$ |
| λ_m | Fluxo do imã permanente | $0,0774 \text{ Wb}$ |
| R_{carga} | Resistência da carga | $19,36 \Omega$ |
| L_{carga} | Indutância da carga | $0,03852 \text{ H}$ |
| ω_R | Velocidade síncrona | 377 rad/s |
| ω_m | Velocidade mecânica do rotor | $94,25 \text{ rad/s}$ |
| C | Capacitância do barramento | $2200 \mu\text{F}$ |
| E^* | Tensão de referência do barramento | 300 V |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| T_p | Constante de tempo da turbina | 2 s |
|-------|-------------------------------|-----|

Nas figuras que se seguem será mostrada a eficiência do controle das grandezas de interesse.

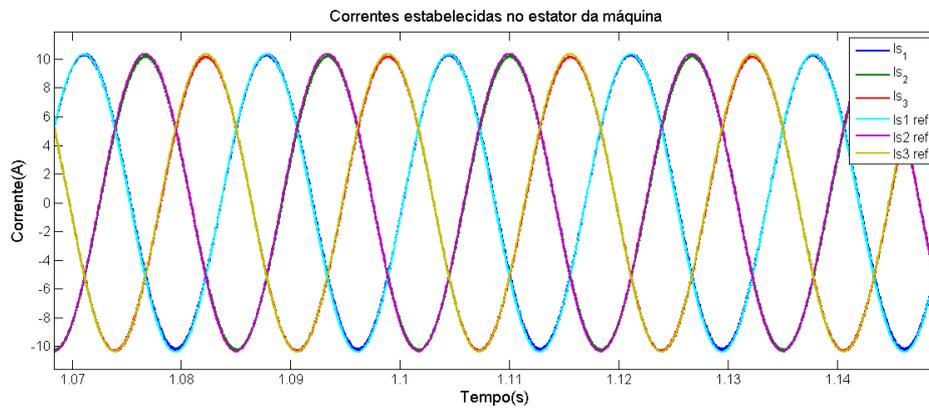


Figura 14. Corrente no estator da máquina.

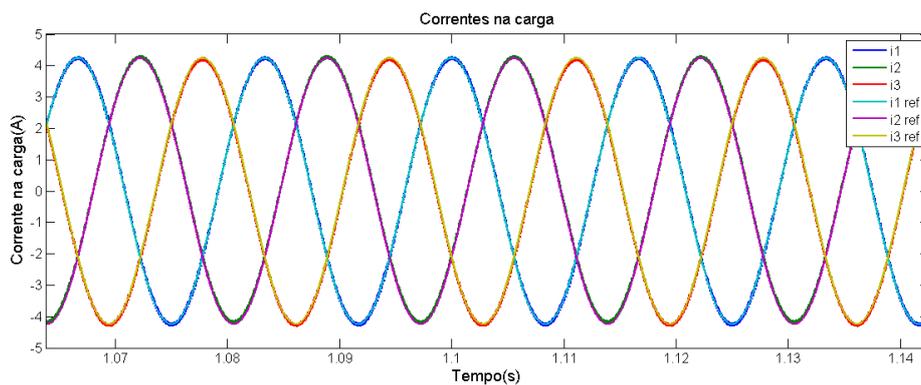


Figura 15. Correntes na carga.

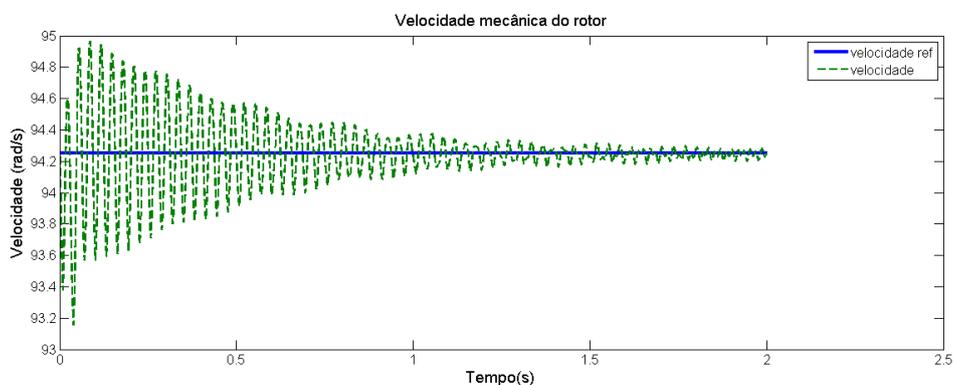


Figura 16. Velocidade mecânica do rotor.

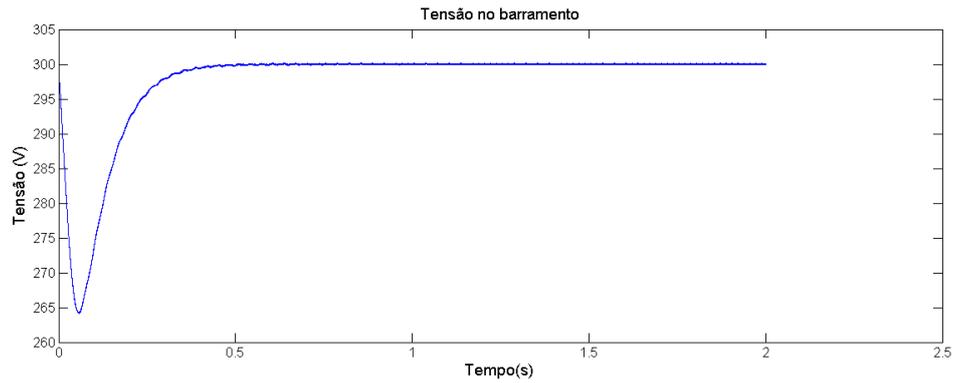


Figura 17. Tensão no barramento.

Logo, nota-se que os controles de tensão, correntes e velocidades se mostraram eficazes e levaram essas grandezas aos seus valores desejados para assegurar o fluxo de potência da geração para a carga. Vale salientar que as curvas para as correntes estão em regime permanente, enquanto as curvas para tensão e velocidade apresentam, além do regime permanente, o regime transitório.

Já nas figuras 18 e 19 são ilustradas as tensões chaveadas em uma fase da geração e em uma fase da carga durante um período da frequência fundamental de 60 Hz, ou seja, $T=1/60=0,01666$ s.

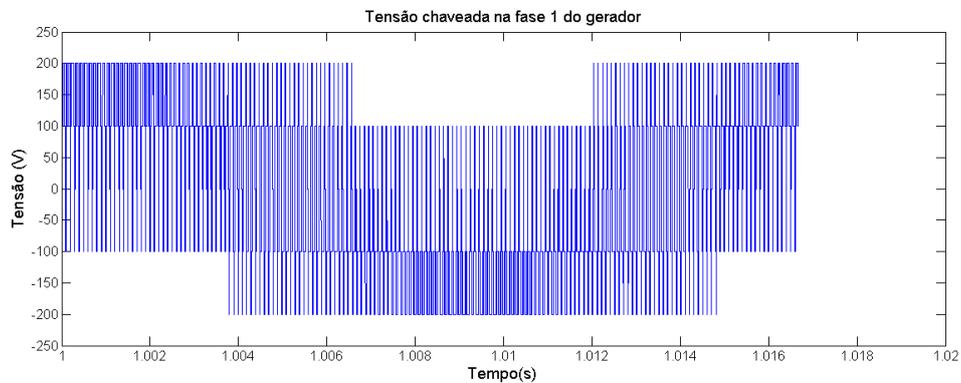


Figura 18. Tensão chaveada na geração.

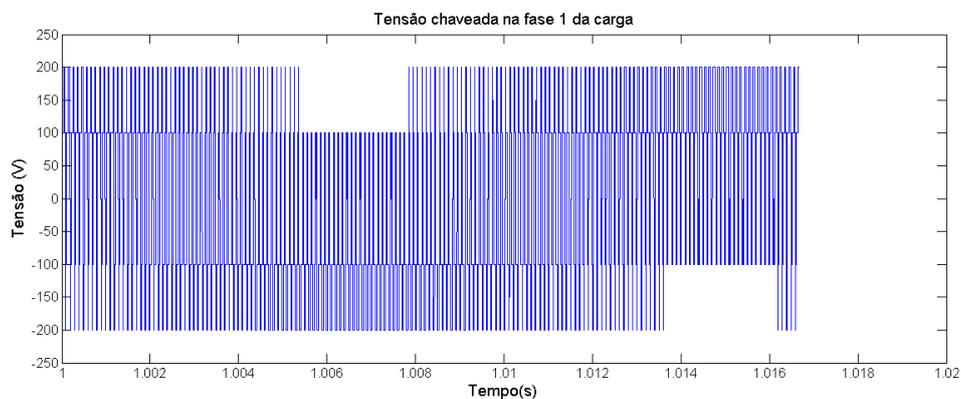


Figura 19. Tensão chaveada na carga.

O WTHD para essas tensões foram obtidos e seus valores são:

WTHD da tensão na carga = 0,8472%

WTHD da tensão na geração = 0,5444%

Nota-se que os valores são baixos, caracterizando baixa distorção devido aos harmônicos da frequência de chaveamento sobre as tensões na geração e na carga.

Vale salientar que são utilizadas três portadoras triangulares defasadas 120° uma da outra. Cada uma foi utilizada para realização do PWM de um braço do retificador e de um braço do inversor.

4.2 RESULTADOS – TOPOLOGIA PROPOSTA

A tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros da máquina a imã permanente usada na simulação e da carga elétrica.

Tabela 2. Parâmetros de simulação – topologia proposta

| Parâmetro | Definição | Valor |
|-------------|---|--|
| P | Número de pares de pólos da máquina | 11 |
| L_d | Componente da indutância estatórica no eixo direto | $7,98 \times 10^{-3} H$ |
| L_q | Componente da indutância estatórica no eixo em quadratura | $9,987 \times 10^{-3} H$ |
| R_s | Resistência estatórica | $1,928 \Omega$ |
| J_m | Momento de Inércia da máquina | $0,03 \text{ kg.m}^2$ |
| F_m | Coefficiente de atrito | $1 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2/\text{s}$ |
| λ_m | Fluxo do imã permanente | $0,342 \text{ Wb}$ |
| R_{carga} | Resistência da carga | $19,36 \Omega$ |
| L_{carga} | Indutância da carga | $0,03852 H$ |
| ω_R | Velocidade síncrona | 377 rad/s |

| | | |
|------------|---|---------------------|
| ω_m | Velocidade mecânica do rotor | $34,27\text{rad/s}$ |
| C | Capacitância do barramento | $2200\ \mu\text{F}$ |
| E^* | Tensão de referência do barramento | $300\ \text{V}$ |
| α | Defasagem entre os grupos ímpar e par na máquina hexafásica | 0° |
| T_p | Constante de tempo da turbina | $2\ \text{s}$ |
| L_{ls} | Indutância de dispersão do estator | $0,1L_{sd}$ |

Para as simulações, não foi implementado o controle de corrente na carga. Arbitrando um valor de potência demandada, as tensões de referência nas pontes H do inversor foram impostas e o PWM foi realizado com base nessas tensões.

As figuras 20 e 21 retratam o controle das correntes nas seis fases da máquina a ímã permanente.

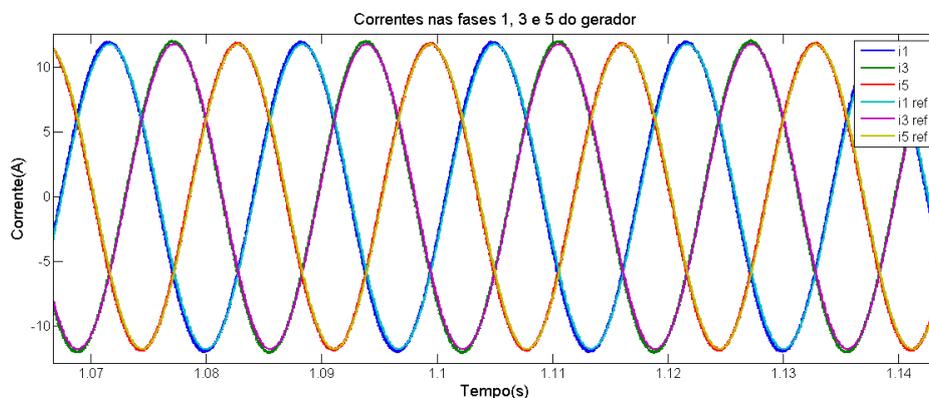


Figura 20. Correntes nas fases ímpares do gerador.

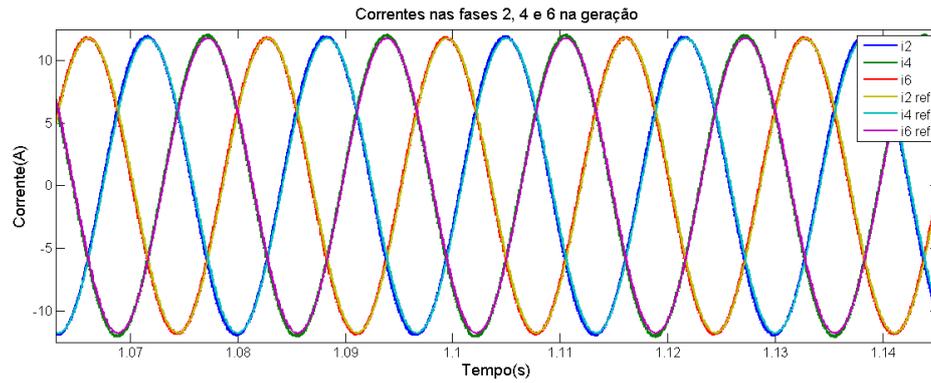


Figura 21. Correntes nas fases pares do gerador.

A seguir, a figura 22 ilustra o funcionamento do controle de velocidade mecânica do rotor.

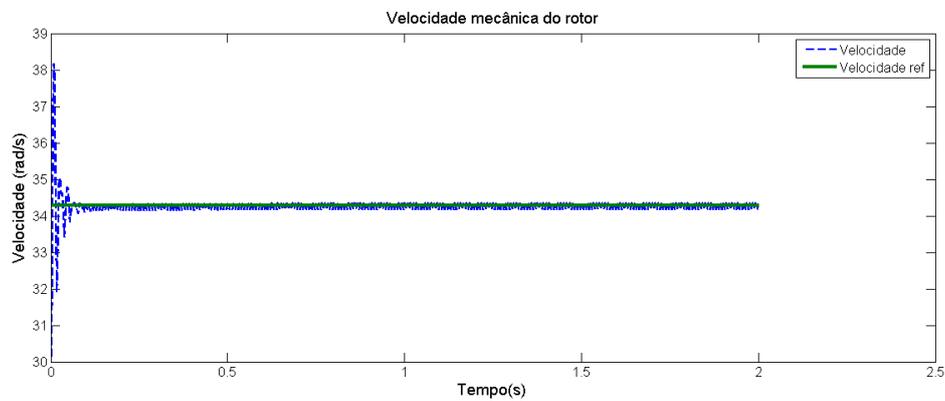


Figura 22. Velocidade mecânica do rotor – topologia proposta.

Por fim, a figura 23 apresenta o valor médio das tensões nos barramentos e da figura 24 à 29 tem-se os valores das tensões em cada barramento.

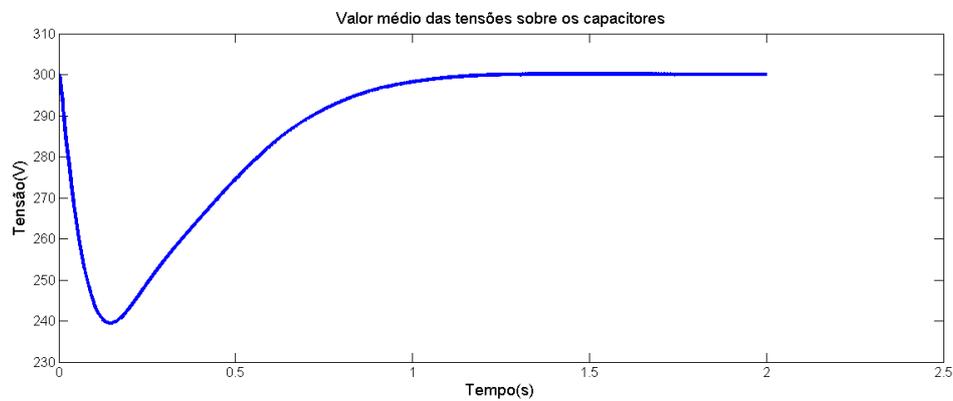


Figura 23. Valor médio das tensões sobre os capacitores.

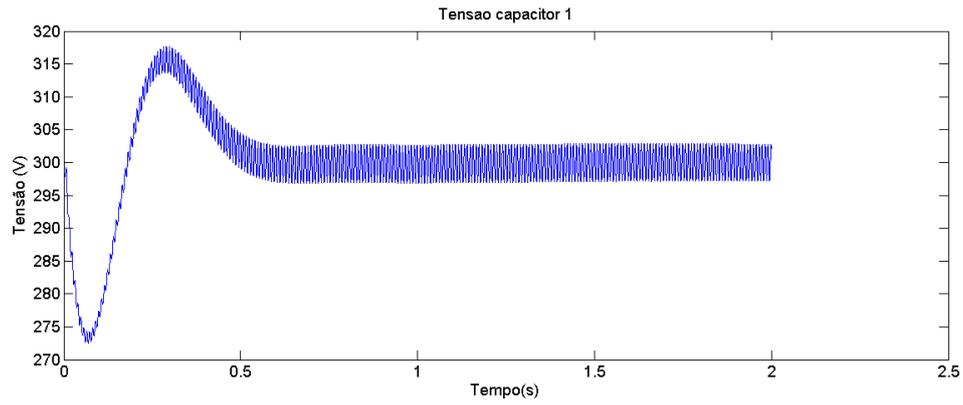


Figura 24. Tensão no barramento 1.

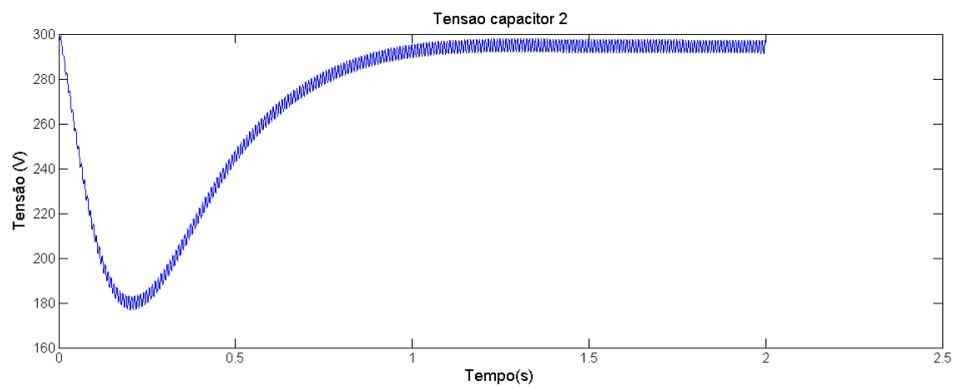


Figura 25. Tensão no barramento 2.

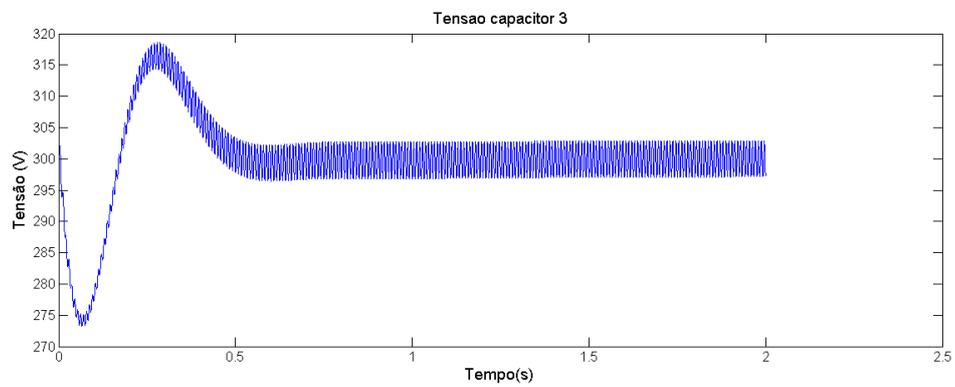


Figura 26. Tensão no barramento 3.

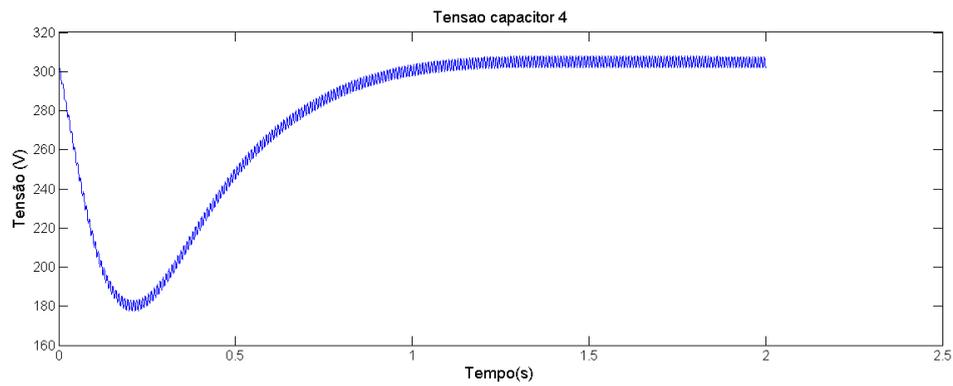


Figura 27. Tensão no barramento 4.

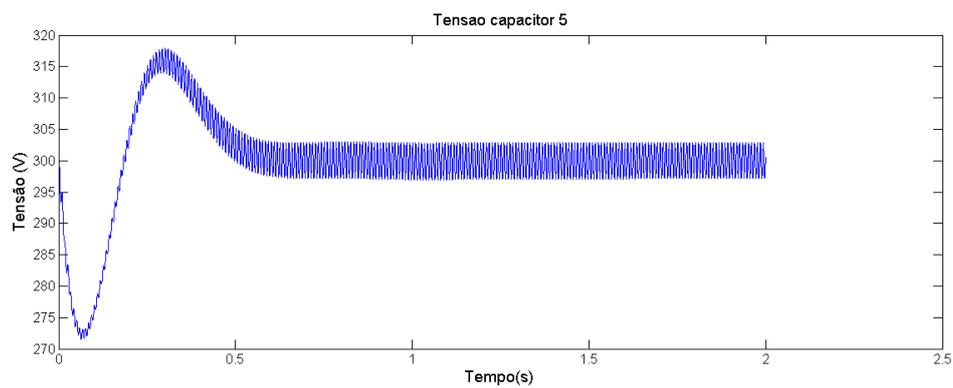


Figura 28. Tensão no barramento 5.

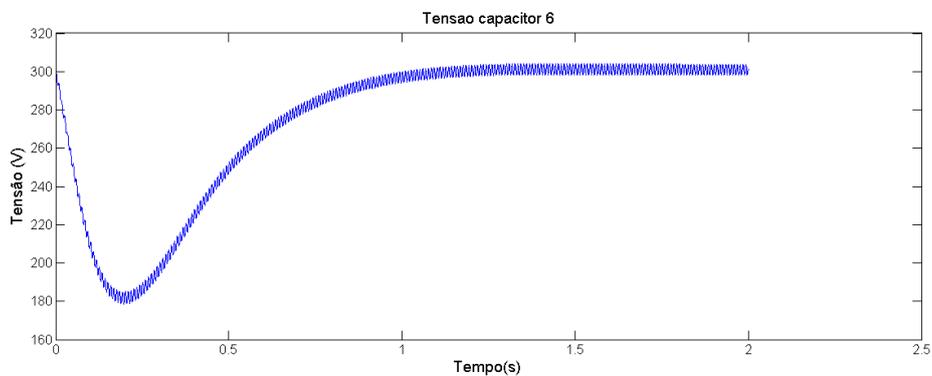


Figura 29. Tensão no barramento 6.

Nota-se que os controles se mostraram eficazes e as variáveis de interesse foram controladas, assegurando o fluxo de potência da maneira desejada. Vale salientar que novamente as curvas das correntes estão em regime permanente, enquanto as curvas de velocidade, tensão média dos barramentos e tensão individual de cada barramento apresentam, além do regime permanente, o regime transitório.

As figuras 30 e 31 mostram tensões chaveadas para uma fase da geração e uma fase da carga, respectivamente, para um período da frequência de 60 Hz.

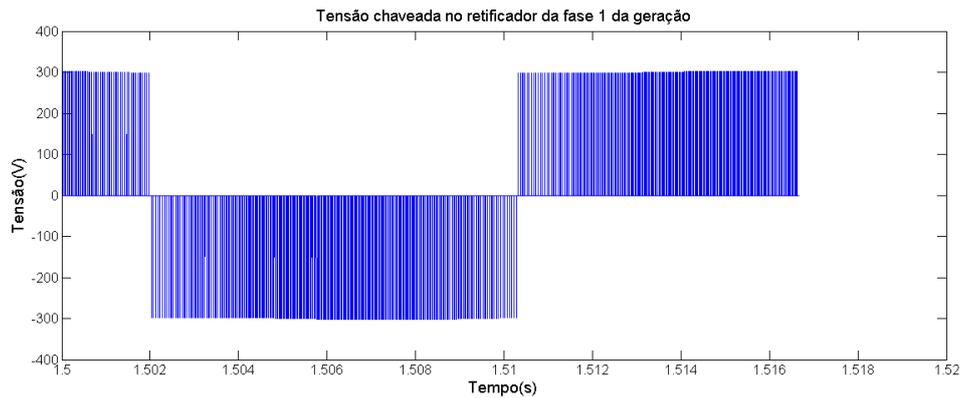


Figura 30. Tensão chaveada – fase 1 da geração.

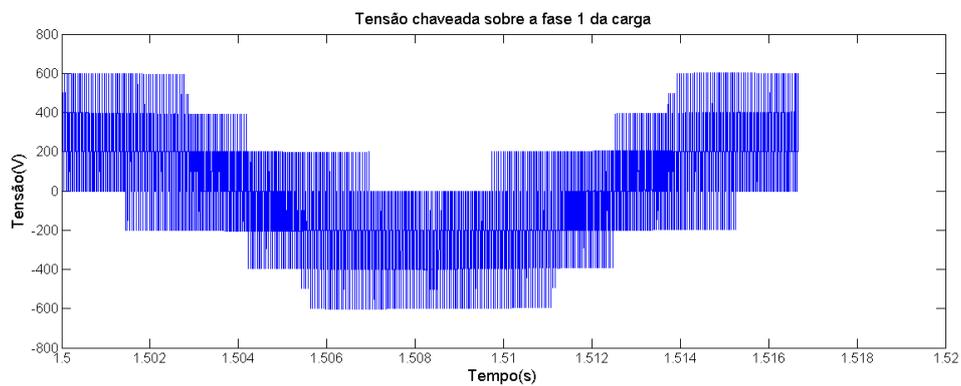


Figura 31. Tensão chaveada – fase 1 da carga.

Os respectivos WTHD são:

WTHD tensão na carga: 0,2403 %

WTHD tensão na geração: 0,3863 %

Nota-se que o WTHD da tensão na carga é bem menor que o valor encontrado para a topologia convencional. Isso se dá devido à associação em série de dois conversores para a alimentação de uma fase da carga, gerando um maior número de níveis. Já para a tensão chaveada na geração, mesmo com somente três níveis, o valor do WTHD é menor que o encontrado para a topologia convencional.

Vale salientar que foram utilizadas três portadoras triangular defasadas 120° uma da outra. A primeira portadora foi utilizada para realização do PWM dos conversores dos barramentos 1 e 2, a segunda para os conversores dos barramentos 3 e 4, e a última para os conversores do barramento 5 e 6.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi realizado o estudo de topologias de conversores e estratégias de controle para sistemas de geração com fontes primárias controladas. No caso abordado, a fonte primária é a turbina a gás.

Para a topologia trifásica convencional, bem como para a topologia proposta, foram apresentados os modelos matemáticos das máquinas a imã permanente, além da descrição de toda a estratégia PWM e dos sistemas de controle.

Os resultados de simulação retratam a eficácia dos sistemas de controle em fazer com que os valores de referência de tensão, corrente e velocidade sejam atingidos, assegurando o fluxo de potência aconteça da maneira desejada.

O WTHD, parâmetro que mede a distorção harmônica das tensões devido ao chaveamento, mostrou-se melhor para a topologia proposta que para a topologia convencional. Isso acontece devido à associação em série dos inversores quando da alimentação da carga e devido ao maior número de fases na geração.

A principal perspectiva é o estudo mais aprofundado da influência da alta frequência de giro da microturbina no sistema, não abordada neste trabalho, bem como propor soluções para mitigar os possíveis problemas trazidos por essa característica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gustavo K. Dill, **Análise da operação de células combustíveis e microturbinas a gás em sistemas de potência**, Dissertação de mestrado, PUC-RS, Porto Alegre, 2008.
- [2] Felipe S. de Bona, **As Microturbinas e a Geração Distribuída**, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas.
- [3] Felipe S. de Bona, **Modelo para simulação de uma microturbina**, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas.
- [4] Eisenhower Fernandes, **Estimação de posição e velocidade de uma máquina síncrona a imã permanente**, Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, 2006.
- [5] Cursino Brandão Jacobina, **Sistema de acionamento estático de máquina elétrica**, Apostila de Acionamentos Elétricos, UFCG, 2005.
- [6] Reginaldo Sousa Miranda, **Sistemas de Acionamentos CA Multifases com Estratégias de Controle Tolerante à Falhas e Redução da Tensão de Modo Comum**, Tese de doutorado, UFCG, Campina Grande, 2007.