



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALYSSON VASCONCELOS GOMES DE MENEZES**

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA  
EÓLICA EM ELÉTRICA**

Campina Grande, Paraíba,  
Junho de 2011.

ALYSSON VASCONCELOS GOMES DE MENEZES

ESTUDO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA  
EÓLICA EM ELÉTRICA

*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., UFCG

Campina Grande, Paraíba,  
Junho de 2011.

ALYSSON VASCONCELOS GOMES DE MENEZES

ESTUDO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA  
EÓLICA EM ELÉTRICA

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

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

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e orientaram, construindo uma base sólida para que eu chegasse até aqui. Dedico também à minha irmã, noiva e filho, que vêm me propiciando muitos momentos felizes nos últimos seis anos.

*“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.”*

*Max Weber*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por todo apoio e dedicação durante todos esses anos de minha vida, à minha irmã pelo companheirismo e bons conselhos, à minha noiva e meu filho pelo apoio e paciência e a todos os meus familiares e amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação e com os quais compartilhei muitas alegrias e dúvidas.

Agradeço também à todos os professores que, com muita dedicação e amor à profissão, apresentaram os conteúdos que compõem a grade curricular do curso. Em especial, agradeço aos professores Cursino Brandão Jacobina, Edmar Candeia Gurjão, Raimundo C. S. Freire, Glauco Fontgalland e Péricles Rezende de Barros, pela contribuição particular de cada um deles a minha formação acadêmica.

Finalmente, agradeço a todos que compõem a coordenação do curso de Engenharia Elétrica da UFCG e também ao governo brasileiro pelas excelentes oportunidades que são dadas aos estudantes.

# Sumário

Agradecimentos	6
Sumário	7
<b>1 Introdução</b>	<b>10</b>
<b>2 Topologia convencional</b>	<b>12</b>
2.1 Descrição do sistema . . . . .	12
2.2 Sistema de conversão . . . . .	13
2.3 Uso da máquina de indução como gerador . . . . .	15
2.3.1 Controle de velocidade da máquina assíncrona . . . . .	16
2.4 Sistema de condicionamento de energia . . . . .	18
2.5 Resultados de simulações utilizando uma PMSM como gerador . . . . .	19
2.6 Resultados de simulações utilizando uma MIT como gerador . . . . .	20
<b>3 Topologia com Filtro Ativo de Potência (FAP)</b>	<b>23</b>
3.1 Descrição do sistema . . . . .	23
3.2 Diagramas de controle . . . . .	23
3.3 Resultados de simulações . . . . .	26
<b>4 Conclusões e perspectivas</b>	<b>28</b>
Bibliografia	29

# Lista de Figuras

2.1	Representação do sistema convencional de geração de energia elétrica a partir de energia eólica: (a) modelo unifilar; e (b) modelo a 3 fios simplificado. . . . .	12
2.2	Circuito elétrico equivalente da máquina síncrona à ímã permanente. . . . .	14
2.3	Diagrama de controle do sistema de geração. . . . .	15
2.4	Circuito equivalente por fase da máquina de indução. . . . .	15
2.5	Diagrama de controle: (a) obtenção do ângulo de referência do fluxo; e (b) obtenção das tensões estatóricas de referência. . . . .	18
2.6	Diagrama de controle do sistema de condicionamento de energia. . . . .	19
2.7	Grandezas controladas: (a) correntes estatóricas; (b) velocidade do gerador a ímã permanente; (c) tensão no capacitor do barramento; e (d) correntes na carga. . . . .	20
2.8	Grandezas controladas: (a) tensão no capacitor do barramento; e (b) correntes na carga. . . . .	20
2.9	Grandezas controladas. . . . .	21
2.10	Grandezas controladas. . . . .	21
2.11	Grandezas controladas em regime permanente: (a) correntes estatóricas; e (b) correntes na carga. . . . .	22
3.1	Topologia do sistema de geração de energia elétrica a partir de eólica. . . . .	24
3.2	Controle de velocidade do gerador. . . . .	24
3.3	Controle de tensão no capacitor do filtro. . . . .	25
3.4	Grandezas controladas: (a) velocidade do gerador ( $rad/s$ ); (b) Correntes estatóricas; e (c) tensão no capacitor do FAP. . . . .	26



3.5	Grandezas controladas: (a) tensão no capacitor do barramento; e (b) correntes na carga. . . . .	27
-----	---	----

# Capítulo 1

## Introdução

Nos dias atuais há uma imensa preocupação com a preservação dos recursos naturais do nosso planeta. Assim, há diversas linhas de pesquisa voltadas para o que chamamos de *desenvolvimento sustentável*. O desenvolvimento sustentável busca impulsionar a economia e garantir uma boa qualidade de vida para as pessoas, causando o mínimo de impactos ambientais no planeta. Para isso, algumas leis e boas práticas vêm sendo adotadas no mundo todo. Como exemplo, podemos citar as normas que estabelecem limites para emissão de gases poluentes na atmosfera, as que controlam o desmatamento de determinadas regiões, as que incentivam a população a fazer reciclagem de matérias e outras.

A expansão da economia, de um modo geral, traz consigo um aumento na demanda por energia elétrica. Assim, é preciso que o setor energético esteja sempre preparado para suprir a necessidade dos consumidores. Nesse contexto, muitas pesquisas vêm sendo feitas no que diz respeito ao uso de fontes renováveis de energia, também conhecidas como fontes de energia limpa. Nesse grupo, os dois protagonistas são a energia eólica e a energia solar.

Denomina-se **energia eólica** a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas para geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água [1]. Já a **energia solar** é a designação dada a qualquer tipo de captação de energia luminosa (e, em certo sentido, da energia térmica) proveniente do sol, e posterior transformação dessa energia em uma das formas úteis ao homem, seja ela térmica, mecânica ou elétrica.[6]

Neste trabalho serão apresentadas duas topologias de um sistema de geração de energia

elétrica a partir de eólica. A primeira delas empregando um conversor CA/CC-CC/CA em uma configuração conhecida como *back-to-back*. Para este caso, serão apresentados resultados de simulações utilizando tanto uma máquina a ímã permanente quanto uma de indução como dispositivo conversor de energia. Posteriormente, será abordada uma topologia que emprega um filtro ativo de potência e um conversor *boost*. Neste caso, será utilizada uma máquina a ímã permanente como gerador.

# Capítulo 2

## Topologia convencional

### 2.1 Descrição do sistema

Na figura 2.1, é apresentada a topologia convencional do sistema de geração de energia elétrica a partir de energia eólica. Pode-se dividi-la em três estágios: conversão, condicionamento de energia e acoplamento à carga/rede pública. Cada um deles, bem como os respectivos sistemas de controle, serão tratados nas próximas seções.

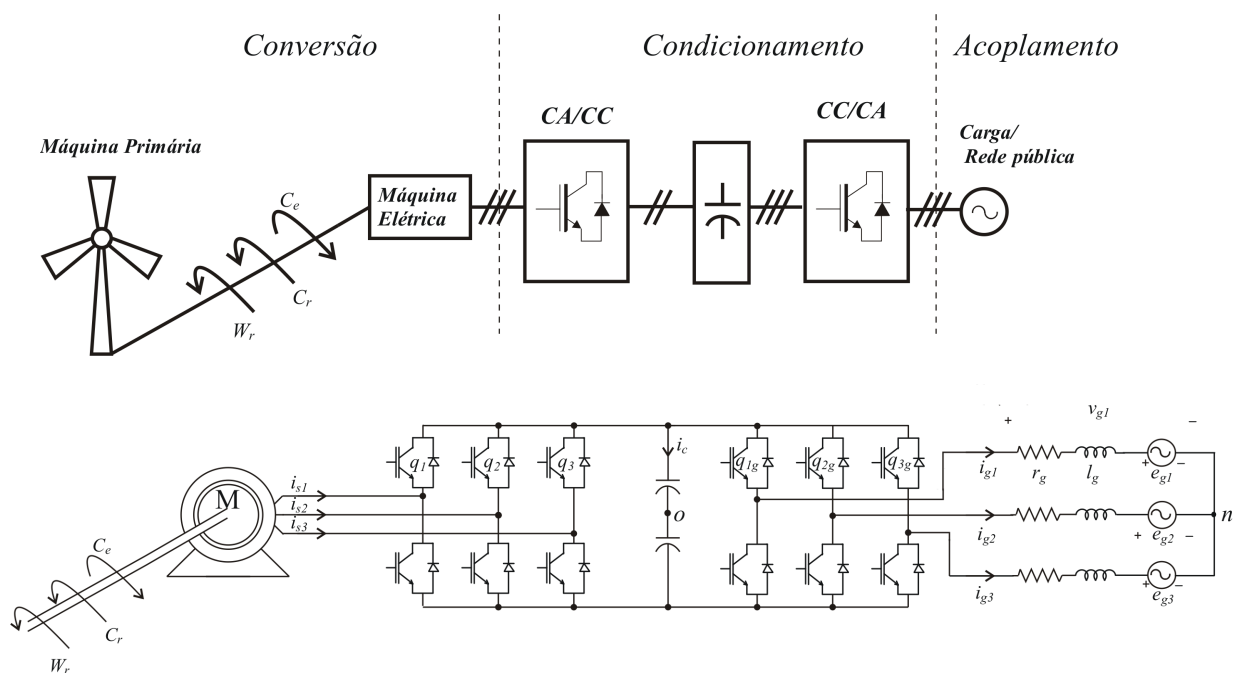


Figura 2.1: Representação do sistema convencional de geração de energia elétrica a partir de energia eólica: (a) modelo unifilar; e (b) modelo a 3 fios simplificado.

O conjugado mecânico,  $C_m$ , aplicado pela máquina primária no eixo da máquina elétrica

depende da velocidade do vento nas lâminas da turbina eólica (TE), no entanto, em um primeiro momento,  $Cm$  será considerado constante. O modelo simplificado que será estudado nas próximas seções é apresentado na figura 2.1b. Os valores de  $r_g$  e  $l_g$  são, respectivamente,  $0,01\Omega$  e  $0,6mH$ .

A técnica de chaveamento PWM foi utilizada para controlar o estado das chaves dos conversores CA/CC e CC/CA. Há dois tipos principais de PWM: comparação seno-triângulo (ou PWM escalar) e o PWM vetorial. A explanação dessas técnicas é feita em [2]. Neste trabalho foi utilizado PWM escalar com apenas uma portadora triangular para os três braços do conversor.

## 2.2 Sistema de conversão

No sistema de conversão, uma máquina elétrica síncrona à ímã permanente, comumente referenciada como PMSM - *Permanent Magnet Synchronous Machine*, foi utilizada como dispositivo conversor de energia. O circuito elétrico equivalente que representa a PMSM é mostrado na figura 2.2 . Nesse circuito, as tensões  $e_{s123}$  são defasadas de  $120^\circ$  entre si e possuem amplitude proporcional à velocidade de giro do rotor da máquina, isto é:

$$E_s = k\omega \quad (2.1)$$

$$e_{s1} = E_s \cos(\omega t)$$

$$e_{s2} = E_s \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_{s3} = E_s \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right),$$

em que  $k$  é uma constante de proporcionalidade,  $E_s$  é a amplitude das tensões geradas e  $\omega$  é a velocidade de giro do fluxo rotórico, que se relaciona com a velocidade de giro do rotor, pela equação:

$$\omega = P\omega_m, \quad (2.2)$$

sendo  $P$  a quantidade de pares de polos da máquina e  $\omega_m$  a velocidade de giro do rotor, em  $rad/s$ . As perdas por dispersão de fluxo magnético e por aquecimento são contabilizadas através da impedância  $Z_s = r_s + jx_s$ . Para as simulações que foram feitas,  $Z_s = (0,01 + j\omega 0,6 \times 10^{-3}) \Omega$

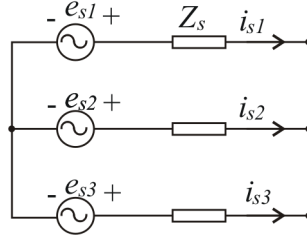


Figura 2.2: Circuito elétrico equivalente da máquina síncrona à ímã permanente.

Uma vez o modelo elétrico apresentado, resta a explanação do modelo mecânico de movimento. Este modelo é obtido aplicando-se a segunda lei de Newton no eixo da máquina, i.e., a força resultante em um corpo é igual a sua massa vezes sua aceleração. Pode-se escrever:

$$c_e - c_m - F_m \omega_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt}, \quad (2.3)$$

em que  $F_m \omega_m$  é o conjugado de atrito que se opõe ao movimento, nos mancais do estator e no ar (aproximadamente proporcional a velocidade) e  $J_m$  é o momento de inércia da máquina. Como se trata de um movimento circular, aparecem na lei de Newton a velocidade angular ( $\omega_m$ ) e o momento de inércia ( $J_m$ ). [2]

Há dois sistemas de controle na geração: o de velocidade da máquina, e o de corrente estatórica. O primeiro deles serve para compatibilizar a potência instantânea produzida pela máquina com a potência fornecida à carga/rede pública. Para isso, utiliza-se um controlador Proporcional Integral (PI) cuja saída é a amplitude da corrente estatórica de referência.

O controle de corrente estatórica é feito através de um controlador *PI-modificado* e tem por objetivo estabelecer as correntes  $i_{s123}^*$  em fase com as tensões  $e_{s123}$ , i.e., manter o *fator de potência (fp)* unitário (ver figura 2.2). A saída desse controlador é a tensão de referência para o PWM no conversor CA/CC.

O *PI-modificado* é um controlador para variáveis de natureza alternada, já o PI tradicional é utilizado quando a grandeza a ser controlada é do tipo contínua.

O diagrama de controle para o sistema de geração é mostrado na figura 2.3, em que o controlador PI de velocidade possui ganhos:  $k_p = 20$  e  $k_i = 3$ .

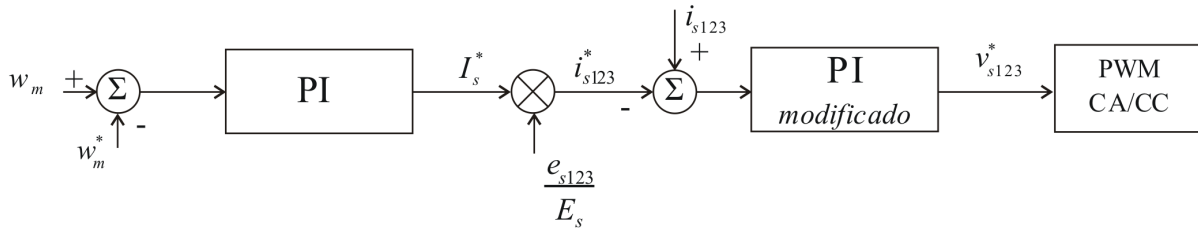


Figura 2.3: Diagrama de controle do sistema de geração.

## 2.3 Uso da máquina de indução como gerador

Na máquina de indução a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, ao passo que o rotor recebe a corrente por indução, como em um transformador [5]. O rotor de uma máquina de indução polifásica pode ser de dois tipos: enrolado (bobinado) ou em gaiola de esquilo. No primeiro deles os terminais do enrolamento do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados montados sobre o eixo, e podem ser acessados externamente por meio de escovas de carvão apoiados sobre esses anéis. Isso permite que um circuito externo seja conectado em série com o do rotor e, desse modo, a característica torque  $\times$  corrente de armadura pode ser modificada. Já as máquinas com rotor em gaiola de esquilo não possuem essa versatilidade, porém elas apresentam duas grandes vantagens em relação as primeiras: custo inferior e maior tempo entre revisões sucessivas.

Na figura 2.4 apresenta-se o circuito equivalente por fase da máquina de indução.

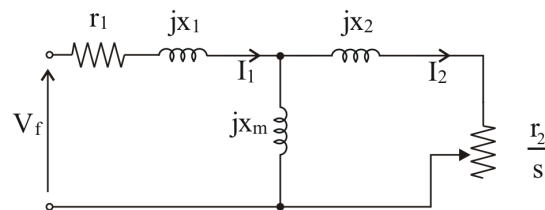


Figura 2.4: Circuito equivalente por fase da máquina de indução.

Em que:

$r_1$ : resistência efetiva do estator [ $\Omega$ /fase];

$x_1$ : reatância de dispersão no estator [ $\Omega$ /fase];

$x_m$ : reatância de magnetização [ $\Omega$ /fase];

$r_2$ : resistência do rotor [ $\Omega$ /fase];

$x_2$ : reatância de dispersão no rotor [ $\Omega$ /fase];

$s$ : escorregamento ( $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$ );

$n_s$ : velocidade síncrona; e

$n_r$ : velocidade do rotor.

Nas simulações com a MIT foram utilizados dos seguintes parâmetros:  $r_1 = 0,39$ ,  $x_1 = \omega 0,094$ ,  $x_m = \omega 0,091$ ,  $r_2 = 1,41$ ,  $x_2 = \omega 0,094$ .

Como o rotor recebe fluxo magnético apenas por indução, para que a máquina assíncrona funcione como gerador é preciso que os terminais do estator estejam alimentados. Uma turbina deve atuar de modo a acelerar o rotor da máquina de indução. Nesse caso, a velocidade do fluxo rotórico ultrapassa a velocidade síncrona e o rotor tende a ser freado pelo fluxo produzido pelo estator. A transferência de energia se dá no sentido da máquina primária para a rede e esse modo de operação é caracterizado por um escorregamento negativo.

Para controlar a velocidade da máquina de indução, utilizamos uma técnica de controle orientada ao fluxo conhecida como IFOC (*Indirect Flux Oriented Control*). A explanação do sistema de controle será feita na próxima seção.

### 2.3.1 Controle de velocidade da máquina assíncrona

Com a inserção do gerador de indução no sistema da figura 2.1, optou-se por empregar uma técnica de velocidade em que o controle do conjugado e do fluxo estão desacoplados. Aqui foi utilizada a versão indireta do controle em quadratura com o fluxo rotórico. O modelo dinâmico que relaciona as correntes estatóricas e o fluxo rotórico no referencial fluxo rotórico é dado por [2]:

$$\frac{l_m}{\tau_r} \dot{\nu}_{sd}^b = \frac{\phi_r}{\tau_r} + \frac{d\phi_r}{dt} \quad (2.4)$$

$$\frac{l_m}{\tau_r} \dot{\nu}_{sq}^b = \omega_{br} \phi_r. \quad (2.5)$$

Conforme apresentado em [2], o conjugado eletromagnético,  $c_e$ , é dado por:

$$c_e = \frac{Pl_m}{l_r} \phi_r \dot{\nu}_{sq}^b, \quad (2.6)$$



em que:

$l_m$ :  $l_m = 1,5M_{sr}$ , sendo  $M_{sr}$  a indutância mútua entre um enrolamento do rotor e outro do estator;

$\tau_r$ : constante de tempo rotórica,  $\tau_r = \frac{l_r}{r_r}$ . Sendo  $l_r$  a indutância própria do rotor e  $r_r$  a resistência rotórica;

$i_{sd}^b$ : corrente estatórica de eixo  $d$  no referencial fluxo rotórico (índice  $b$ );

$i_{sq}^b$ : corrente estatórica de eixo  $q$  no referencial fluxo rotórico;

$\phi_r$ : fluxo rotórico;

$\omega_{br}$ : escorregamento,  $\omega_{br} = \omega_b - \omega_r$ . Sendo  $\omega_b$  a velocidade do fluxo rotórico e  $\omega_r$  a velocidade do rotor [ $rad/s$ ]; e

$P$ : número de pares de pólos da máquina.

O controle indireto de malha aberta pode então ser obtido da equação 2.4 considerando-se  $\frac{d\phi}{dt} = 0$  e usando-se a equação 2.5 para a determinação do escorregamento  $\omega_{br}^*$ . As correntes estatóricas de referência são dadas por [2]:

$$i_{sd}^{s*} = \frac{\phi_r^* \cos(\delta_b^*)}{l_m} - i_{sq}^{b*} \text{sen}(\delta_b^*) \quad (2.7)$$

$$i_{sq}^{s*} = \frac{\phi_r^* \text{sen}(\delta_b^*)}{l_m} + i_{sq}^{b*} \cos(\delta_b^*) \quad (2.8)$$

$$\omega_{br}^* = \frac{l_m i_{sq}^{b*}}{\tau_r \phi_r^*} \quad (2.9)$$

$$\delta_b^* = \int_0^t \omega_{br}^*(\tau) d\tau + \int_0^t \omega_r(\tau) d\tau. \quad (2.10)$$

Assim, o diagrama de controle de velocidade da máquina é apresentado na figura 2.5a, sendo  $R_\omega$  um controlador PI (nos resultados de simulação apresentados adiante o PI de velocidade possui ganhos  $k_p = 0,1$  e  $k_i = 0,5$ ). Primeiramente, obtém-se o ângulo de referência,  $\delta_b^*$ . Posteriormente, a partir das equações 2.7 e 2.8, obtém-se as correntes de referência no referencial estatórico ( $i_{sd}^{s*}$  e  $i_{sq}^{s*}$ ). Finalmente, a partir da transformação  $odq$ , as componentes  $i_{s123}^*$  são obtidas (Figura 2.5b).

O controle de tensão no capacitor do barramento foi apresentado anteriormente na figura 2.6. Nas duas próximas seções serão apresentados alguns resultados de simulações.

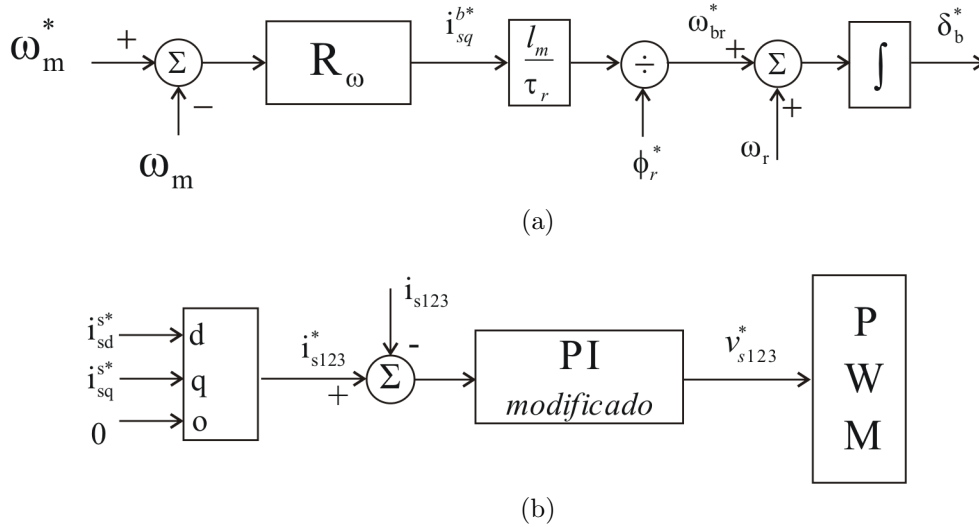


Figura 2.5: Diagrama de controle: (a) obtenção do ângulo de referência do fluxo; e (b) obtenção das tensões estatóricas de referência.

## 2.4 Sistema de condicionamento de energia

A energia gerada depende da velocidade do vento nas pás da turbina eólica. Como essa velocidade pode sofrer bastante flutuação, não é possível conectar diretamente o gerador a carga/rede pública. Desse modo, faz-se necessário um circuito de condicionamento de energia para compatibilizar a amplitude e a frequência da tensão com os valores nominais de tensão e frequência da carga/rede. Contudo, vale lembrar que a carga deve admitir uma potência variável, pois a potência gerada também é variável.

O circuito de condicionamento de energia é composto por um conversor CA/CC, um barramento capacitivo e um conversor CC/CA. A tensão do barramento ( $V_c$ ) é controlada através de um PI seguindo a lógica: dado inicialmente  $V_c = V_c^*$ , quando  $V_c$  diminui, a amplitude das correntes de referência na carga,  $I_g^*$ , também diminui, i.e., a energia consumida pela carga deve diminuir para que o capacitor do barramento não descarregue por completo. Por outro lado, se a tensão no barramento começa a subir, a carga pode consumir maior potência, o que implica no aumento de  $I_g^*$ .

As chaves do conversor CC/CA são controladas de modo a manter a tensão média desejada nos terminais da carga. A tensão média de referência é definida por meio de um *PI-modificado* de maneira a estabelecer as correntes  $i_{g123}^*$  na carga (Figura 2.1). Observe que as tensões  $e_{g123}$  e correntes  $i_{g123}$  devem estar em fase, i.e.,  $fp = 1$ .

O diagrama de controle do sistema de condicionamento de energia é mostrado na figura 2.6. Os ganhos do PI de tensão no capacitor são:  $k_p = 0,5$  e  $k_i = 5,0$ .

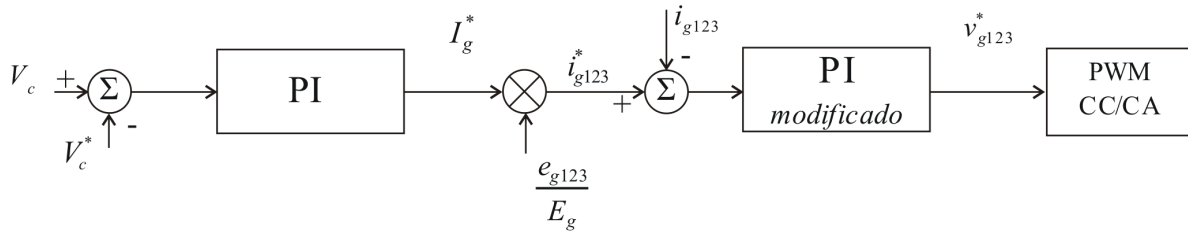


Figura 2.6: Diagrama de controle do sistema de condicionamento de energia.

## 2.5 Resultados de simulações utilizando uma PMSM como gerador

A partir das figuras 2.7 e 2.8, é possível constatar que todas as grandezas monitoradas foram controladas.

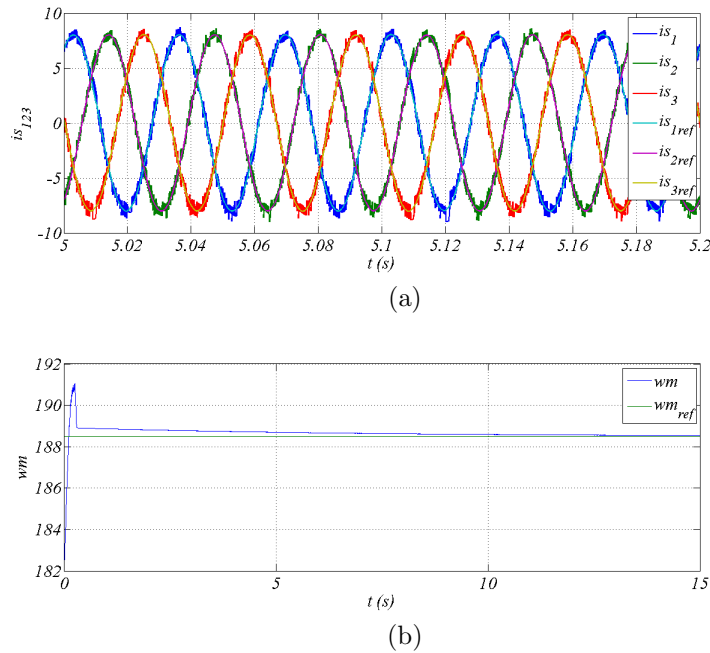


Figura 2.7: Grandezas controladas: (a) correntes estatóricas; (b) velocidade do gerador a ímã permanente; (c) tensão no capacitor do barramento; e (d) correntes na carga.

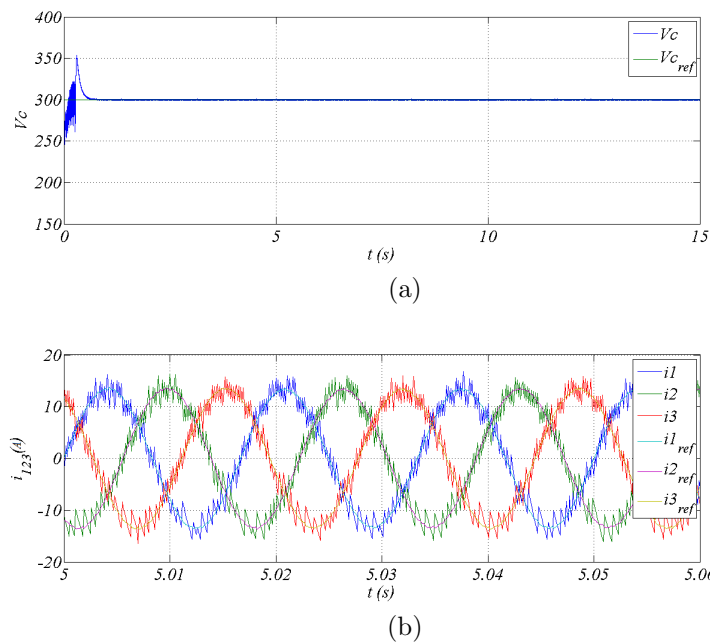


Figura 2.8: Grandezas controladas: (a) tensão no capacitor do barramento; e (b) correntes na carga.

## 2.6 Resultados de simulações utilizando uma MIT como gerador

Na figura 2.9 observa-se que a máquina funciona como motor até  $t = 3s$ . A partir desse instante, um conjugado mecânico a favor da rotação passa a ser aplicado ( $c_m = -40N.m$ ).

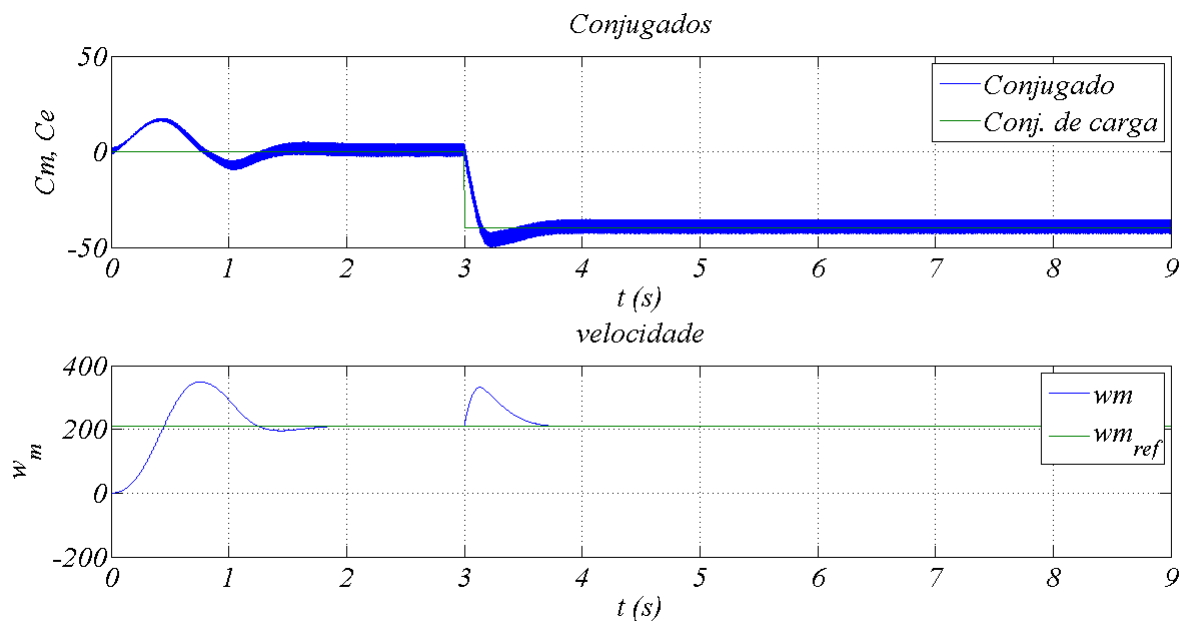


Figura 2.9: Grandezas controladas.

Enquanto a máquina funciona como motor em vazio, a corrente de referência na carga é bem próxima de zero. Uma vez operando como gerador essa corrente aumenta de modo a manter a tensão do capacitor no valor de referência. Esse comportamento é evidenciado na figura 2.10.

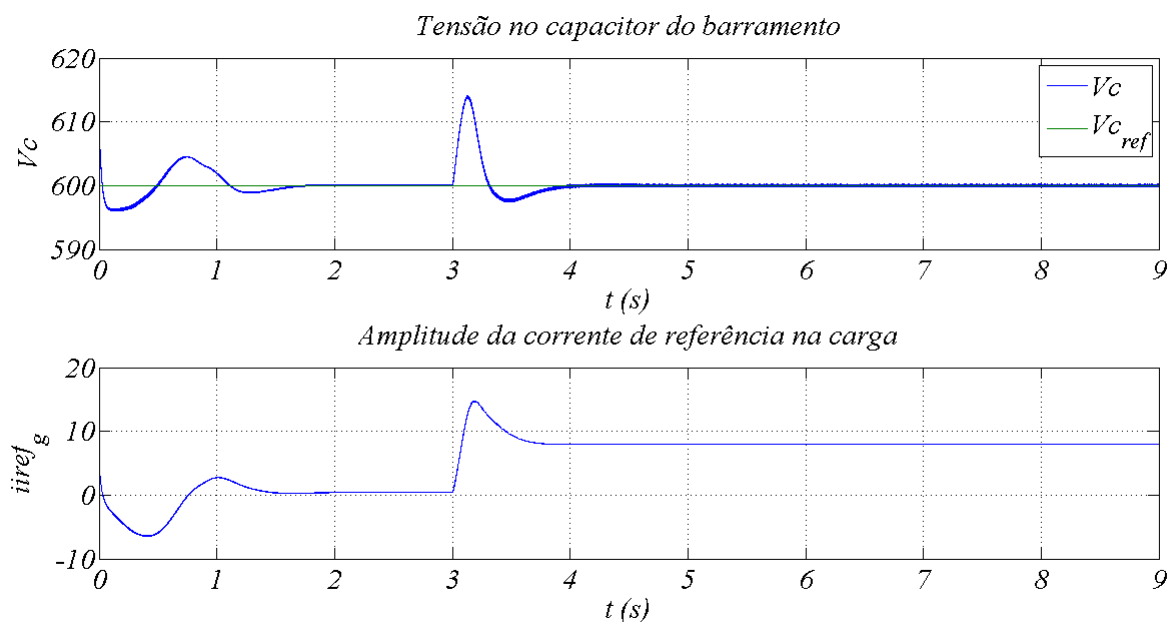


Figura 2.10: Grandezas controladas.

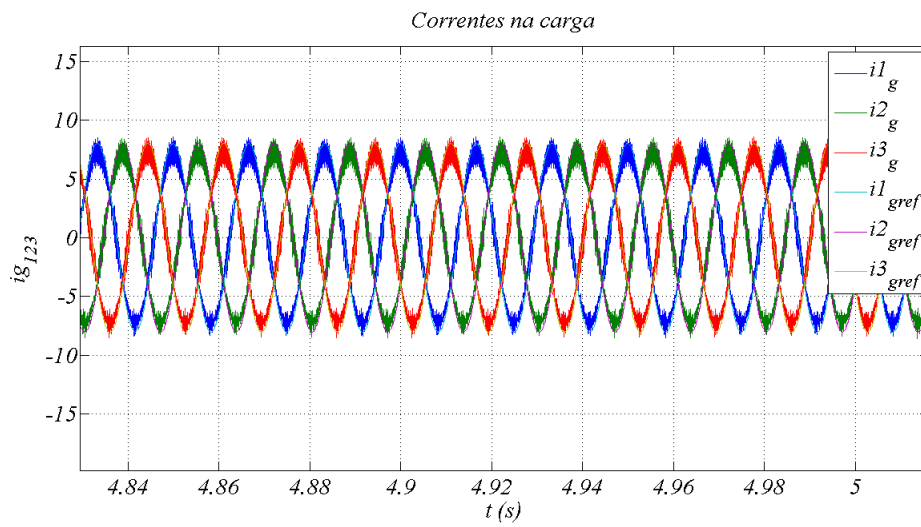
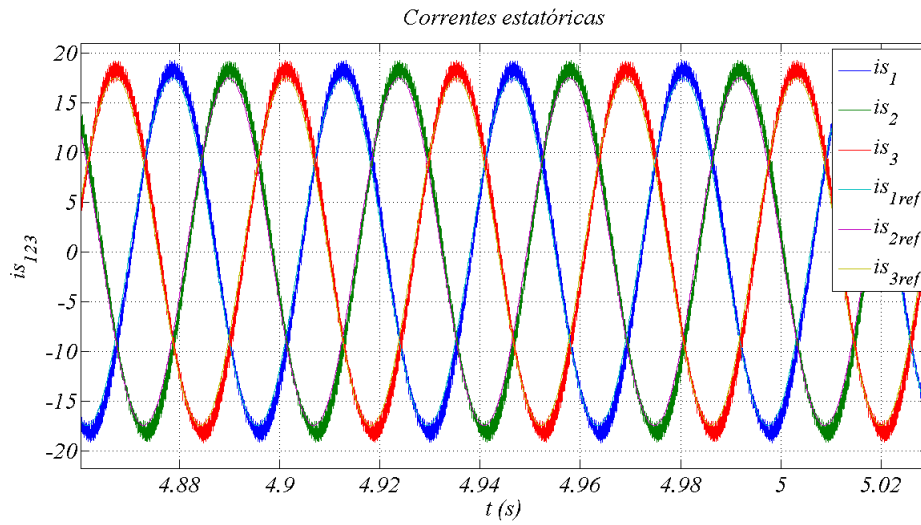


Figura 2.11: Grandezas controladas em regime permanente: (a) correntes estatóricas; e (b) correntes na carga.

# Capítulo 3

## Topologia com Filtro Ativo de Potência (FAP)

### 3.1 Descrição do sistema

Nesta segunda topologia uma ponte retificadora a diodos é instalada na saída do gerador, o que provoca distorções nas correntes estatóricas ( $i_{s123}$ ). Para compensar esses reativos e harmônicos será utilizado um Filtro Ativo de Potência (FAP), como mostrado na figura 3.1.

A grande vantagem em relação à topologia convencional é que o preço da ponte a diodos é bem inferior quando comparado com o do conversor trifásico CA/CC. O conversor empregado no FAP é de baixa potência e seu valor no mercado também é muito menor que o do conversor de alta potência. Em contrapartida, é possível citar alguns inconvenientes: um deles é a necessidade de um conversor boost para elevar a tensão de saída da ponte a diodos e regular a tensão no barramento. Ocorre também um ligeiro aumento na complexidade do sistema; agora, a sintonia dos controladores do sistema de geração e condicionamento de energia é mais delicada. A presença de um maior número de semicondutores ocasiona mais perdas e, conseqüentemente, diminuição na eficiência do sistema [4].

Os valores de  $r_g$ ,  $l_g$ ,  $l_f$ ,  $l_b$  e da amplitude de  $e_{g123}$  são:  $0,01\Omega$ ,  $6e - 4H$ ,  $0,03e - 4H$ ,  $0,3e - 4H$  e  $1,0p.u.$ , respectivamente.

### 3.2 Diagramas de controle

Para compatibilizar a potência gerada com a consumida pela carga utiliza-se a seguinte estratégia: o erro de velocidade fornece a amplitude da corrente de referência para a carga,

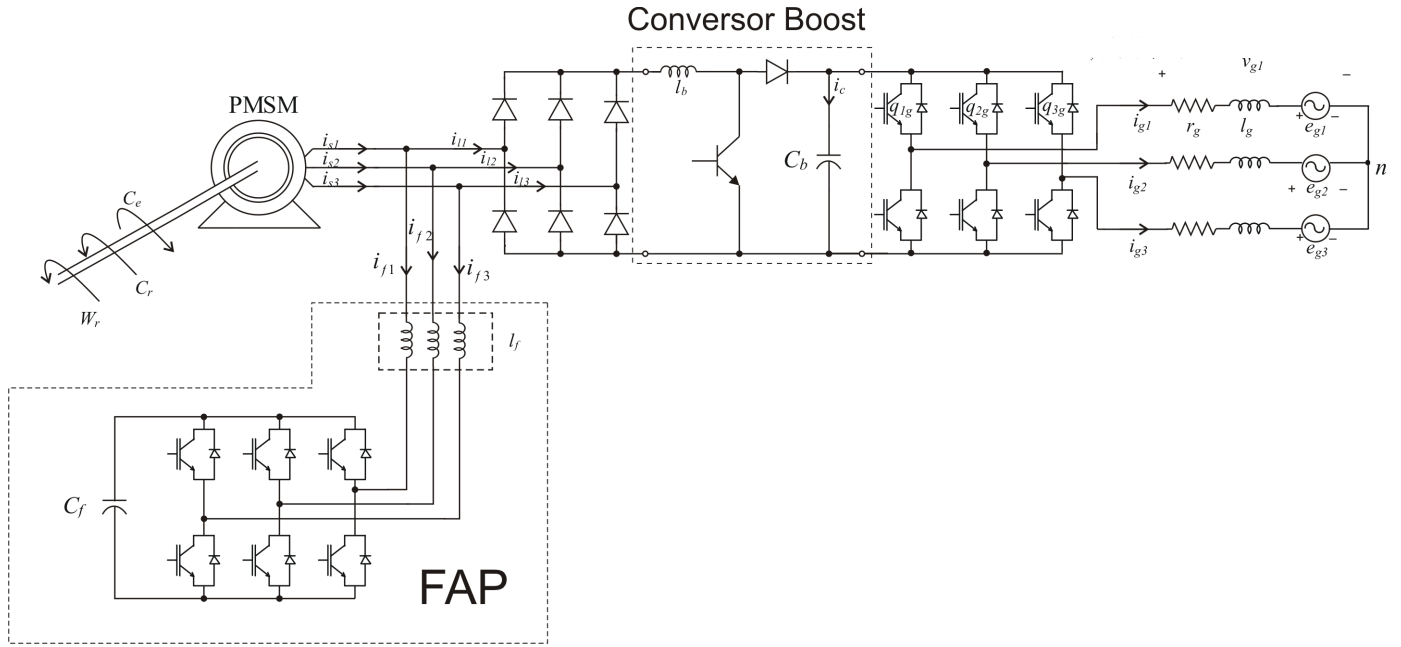


Figura 3.1: Topologia do sistema de geração de energia elétrica a partir de eólica.

conforme apresentado na figura 3.2.

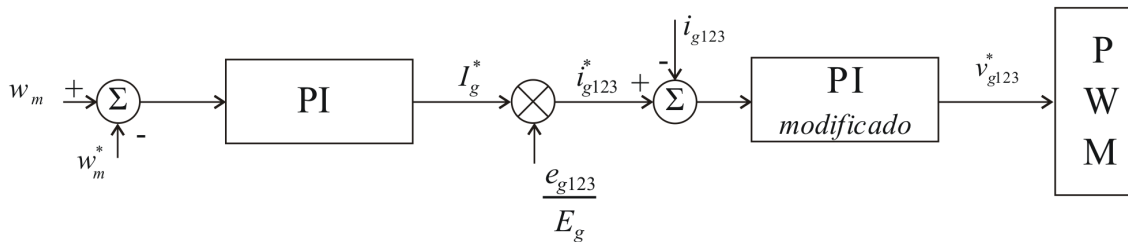


Figura 3.2: Controle de velocidade do gerador.

O diagrama de controle da tensão sobre o capacitor do filtro,  $C_f$ , é mostrado na figura 3.3 (ganhos do PI:  $k_p = 0,5$  e  $k_i = 5,0$ ). A amplitude da corrente estatórica de referência,  $I_s^*$  é composta de duas parcelas: a componente requerida pelo filtro,  $I_f^*$ , e outra para contabilizar a potência consumida na carga ( $I_2^* = \frac{E_g}{E_s} I_g^*$ ). Como as perdas não são consideradas,  $C_f$  começa a descarregar. Para compensar esse efeito, o controle da tensão sobre  $C_f$  aumenta a amplitude da corrente estatórica de referência ( $I_s^*$ ) fazendo com que a máquina perca velocidade. Finalmente, o controle de velocidade diminui  $I_g^*$ , i.e., a potência consumida pela carga diminui e o sistema entra em equilíbrio.

Para controlar a tensão no capacitor do barramento utilizou-se um controlador PI cuja



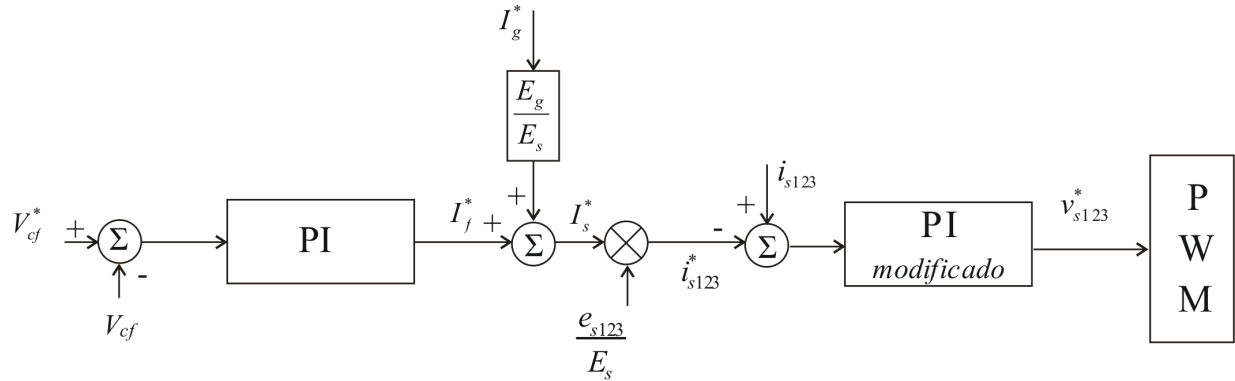


Figura 3.3: Controle de tensão no capacitor do filtro.

entrada é o erro da tensão  $V_c$  e a saída é a razão cíclica,  $q$ , do conversor *boost*. Trata-se da razão entre o tempo em que o transistor bipolar permanece em estado de condução e o período do chaveamento, i.e.,  $q = t_{on}/T$ . Conforme demonstrado em [3], quanto menor o  $q$  maior o ganho de tensão dado pelo conversor. Na próxima seção os resultados de simulações para essa topologia serão apresentados.

### 3.3 Resultados de simulações

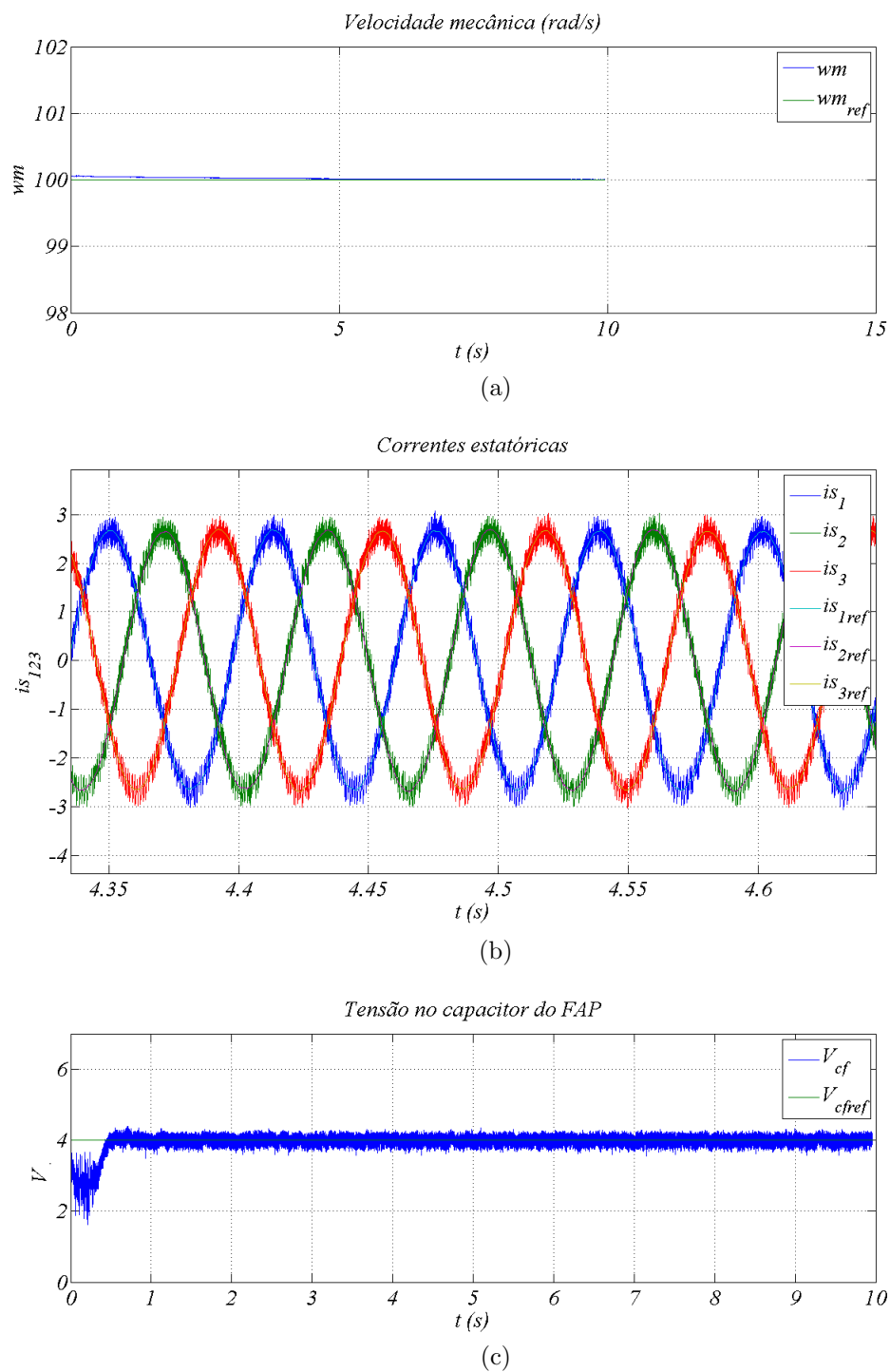


Figura 3.4: Grandezas controladas: (a) velocidade do gerador ( $rad/s$ ); (b) Correntes estatóricas; e (c) tensão no capacitor do FAP.

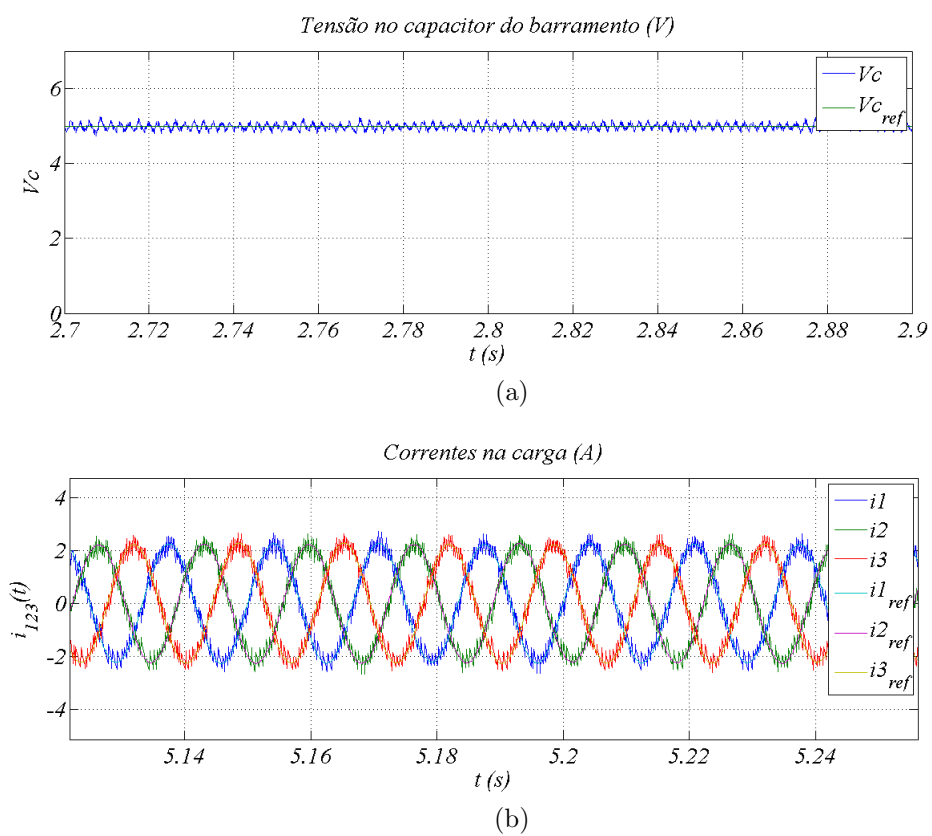


Figura 3.5: Grandezas controladas: (a) tensão no capacitor do barramento; e (b) correntes na carga.

# Capítulo 4

## Conclusões e perspectivas

Neste trabalho foram apresentadas duas topologias para um sistema de geração de energia elétrica a partir de eólica. Uma delas utilizando conversores na configuração *back-to-back* e outra empregando um filtro ativo de potência e um conversor *boost*. A principal vantagem da topologia convencional em relação a segunda é a sua facilidade de implementação e controle. Na topologia com FAP, o conversor CA/CC é substituído por uma ponte a diodos, o que torna o sistema mais barato. Por outro lado, a inserção de mais dispositivos semicondutores ocasiona uma diminuição na eficiência do sistema e seu efeito cumulativo pode vir a superar os lucros advindos do uso desses componentes.

A realização de uma montagem experimental envolvendo um motor de indução operando como gerador, bem como a aquisição de dados são duas perspectivas imediatas para este trabalho.

# Bibliografia

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), *Energia Eólica*, Website, 2011, [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/energia\\_eolica.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/energia_eolica.htm), acessado em 30/06/2011, 12:50.
- [2] C. B. Jacobina, “*Sistemas de Acionamento Estático de Máquina Elétrica*”, Curso de acionamento estático de máquinas elétricas, UFCG, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.
- [3] N. Mohan; T. M. Undeland; W. P. Robbins, “*Power Electronics*”, 3<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, INC, 2009.
- [4] D. S. Oliveira Jr.; M. M. Reis; C. E. A. Silva; L. H. S. C. Barreto; F. L. M. Antunes; B. L. Soares, “*A Three-Phase High-Frequency Semicontrolled Rectifier for PMWECS*”, IEEE Transactions on Power Electronics (2010).
- [5] A. E. Fitzgerald; C. Kingsley Jr.; S. D. Umans, “*Máquinas Elétricas*”, 6<sup>a</sup> ed., Bookman, 2006.
- [6] Wikipedia, *Energia Solar*, Website, 2011, [http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_solar](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_solar), acessado em 30/06/2011, 12:50.