



**FUNDAÇÃO  
UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE  
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,  
ARQUITETURA E URBANISMO E  
GEOGRAFIA**

---

**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Estudo comparativo sobre os conversores eletrônicos de potência  
mais utilizados com o gerador de indução duplamente alimentado  
na geração eólica.**

**Taiara Turri Brufatto**

**Campo Grande MS**

**25 de junho de 2019**



**FUNDAÇÃO  
UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE  
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,  
ARQUITETURA E URBANISMO E  
GEOGRAFIA**

**ENGENHARIA ELÉTRICA**

## **Estudo comparativo sobre os conversores eletrônicos de potência mais utilizados com o gerador de indução duplamente alimentado na geração eólica.**

**Taiara Turri Brufatto**

**Orientador:** Luigi Galotto Junior

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Mato Grosso do Sul na Faculdade de  
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e  
Geografia, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheira  
Eletricista.

**Campo Grande MS**

25 de junho de 2019

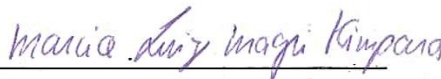
**Estudo comparativo sobre os conversores eletrônicos de potência  
mais utilizados com o gerador de indução duplamente alimentado  
na geração eólica.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de  
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em  
Engenharia Elétrica.

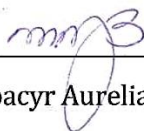
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Luigi Galotto Junior  
Orientador



Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara



Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito

**Campo Grande MS**

25 de junho de 2019

## DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

**Taiara Turri Brufatto**, residente e domiciliado na cidade de **Campo Grande**, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº **49.400.267-0** e CPF nº **415.696.618-63**, declaro que o “Trabalho de Conclusão de Curso” apresentado, com o título **“Estudo comparativo sobre os conversores eletrônicos de potência mais utilizados com o gerador de indução duplamente alimentado na geração eólica.”** é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 25 de junho de 2019.

  
**Taiara Turri Brufatto**

*Dedico esse trabalho à minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus, por todas as oportunidades oferecidas a mim ao longo desses anos e por me abençoar todos os dias.

Aos meus pais, João e Maria Ângela, que com amor e dedicação batalharam para que conseguisse concluir a faculdade, me apoiando em todas as decisões e estando sempre ao meu lado. Agradeço também aos meus irmãos, João José e João Paulo, que mesmo distantes sempre me apoiaram e me ajudaram com palavras de conforto.

Gostaria de agradecer ao meu noivo, Clovis, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da faculdade e por sempre ter sido compreensível comigo.

Aos mestres que ao longo da faculdade compartilharam seus conhecimentos comigo e foram essenciais para que chegasse à conclusão do curso.

Não posso deixar de agradecer em especial o meu orientador, Luigi Galotto Junior, que com sua paciência e compreensão sempre esteve disposto a me auxiliar em todos os momentos de dificuldade para realização desse trabalho.

.

## RESUMO

O trabalho proposto teve como objetivo principal o estudo das topologias de conversores eletrônicos de potência mais utilizados com o gerador de indução duplamente alimentado (*Doubly Fed Induction Generator* - DFIG) aplicadas à geração eólica. A partir da revisão de literatura, foram escolhidas e analisadas 4 topologias utilizadas com o DFIG nestas aplicações. À princípio, foram analisados dois artigos que apresentavam a proposta de topologia mais usual, utilizando o conversor *back-to-back*, com estratégia de controle distintas aplicadas aos conversores ao lado do rotor da máquina (RSC) e ao lado da rede (GSC). Posteriormente, a fim de analisar o desempenho em comparação à topologia usual, foram estudados o conversor de 9 chaves, o conversor em matriz e o conversor *back-to-back* com armazenamento de energia. Com os estudos dos artigos, foi possível realizar uma comparação quantitativa e qualitativa entre as topologias, tomando como referência inicial o conversor *back-to-back*. Os resultados deste trabalho poderão auxiliar futuros trabalhos acadêmicos ou aplicações reais que visem escolher o conversor mais vantajoso.

**Palavras-Chave:** geração eólica, DFIG, conversor, back-to-back.

## ABSTRACT

The main objective of this work was to study power electronic converters topologies applied at the double fed induction generator (DFIG). From the literature review, 4 topologies used with DFIG in these applications were chosen and analyzed. At the beginning, two articles were presented that presented the most usual topology proposal, using the back-to-back converter with PI control strategy applied to the machine side (RSC) and network (GSC) converters. Then, in order to analyze the performance in comparison to the usual topology, the 9-switch converter, the matrix converter and the back-to-back converter with energy storage were studied. With the studies of the articles, it was possible to make a quantitative and qualitative comparison between these articles and topologies, taking as initial reference the back-to-back converter. The results of this work may help future academic studies or real applications that aim to choose the most advantageous converter.

**Keywords:** wind generation, DFIG, converter, back-to-back.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                          |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1  | Matriz energética do Brasil .....                                                                        | 18 |
| Figura 2.2  | Turbina de eixo vertical .....                                                                           | 20 |
| Figura 2.3  | Turbina de eixo horizontal .....                                                                         | 20 |
| Figura 2.4  | Componentes internos da torre cônica .....                                                               | 22 |
| Figura 2.5  | Componentes da turbina de eixo horizontal .....                                                          | 23 |
| Figura 2.6  | Geradores eólicos mais utilizados .....                                                                  | 24 |
| Figura 2.7  | Representação gráfica da transformação de Clarke .....                                                   | 26 |
| Figura 2.8  | Representação gráfica da transformação de Park .....                                                     | 27 |
| Figura 2.9  | Subsistema em cascata .....                                                                              | 28 |
| Figura 2.10 | Subsistema em paralelo .....                                                                             | 29 |
| Figura 2.11 | Sistema de controle com realimentação.....                                                               | 29 |
| Figura 3.1  | Conversor Back-to-Back conectado à rede e ao gerador .....                                               | 31 |
| Figura 3.2  | Conversor <i>back-to-back</i> aplicado com DFIG em uma turbina eólica.....                               | 32 |
| Figura 3.3  | Modos de operação do gerador de indução. (a) Velocidade subsíncrona e (b) Velocidade super-síncrona..... | 33 |
| Figura 3.4  | Resultados da simulação de (Kharchouf, et al., 2017) .....                                               | 34 |
| Figura 3.5  | Fotografia do experimento implementado .....                                                             | 36 |
| Figura 3.6  | Degrau aplicado à tensão do estator. ....                                                                | 37 |
| Figura 3.7  | Resposta experimental à variação de carga em (Chabani, et al., 2017) .....                               | 37 |
| Figura 3.8  | Resposta experimental à variação de velocidade em (Chabani, et al., 2017).38                             |    |
| Figura 3.9  | Conversor de 9 chaves .....                                                                              | 39 |
| Figura 3.10 | Modulação senoidal PWM para o conversor de 9 chaves .....                                                | 40 |

|                    |                                                                                                                                                                                                      |           |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 3.11</b> | <b>Geração de sinais de gate utilizando portas lógicas.....</b>                                                                                                                                      | <b>41</b> |
| <b>Figura 3.12</b> | <b>Resultados da simulação apresentados em (Soe, et al., 2011)43</b>                                                                                                                                 |           |
| <b>Figura 3.13</b> | <b>Implementação do conversor de 9 chaves .....</b>                                                                                                                                                  | <b>44</b> |
| <b>Figura 3.14</b> | <b>Conversor back-to-back com banco de bateria .....</b>                                                                                                                                             | <b>45</b> |
| <b>Figura 3.15</b> | <b>Potência gerada e a potência média em ( Ganti, et al., 2012)47</b>                                                                                                                                |           |
| <b>Figura 3.16</b> | <b>Resultados de simulação em ( Ganti, et al., 2012) .....</b>                                                                                                                                       | <b>48</b> |
| <b>Figura 3.17</b> | <b>Configuração proposta em ( Swami Naidu &amp; Singh, 2014).....</b>                                                                                                                                | <b>49</b> |
| <b>Figura 3.18</b> | <b>Resultados experimentais em ( Swami Naidu &amp; Singh, 2014).....</b>                                                                                                                             | <b>50</b> |
| <b>Figura 3.19</b> | <b>Potência da carga e corrente de carga na fase A, Potência no estator e<br/>corrente de carga na fase A, e Potência no GSC e corrente no transformador do lado do<br/>estator, na fase A. ....</b> | <b>51</b> |
| <b>Figura 3.20</b> | <b>Resultado de simulação em ( Swami Naidu &amp; Singh, 2014) sob aumento na<br/>velocidade do vento (a) e (b), e redução na velocidade do vento (c) e (d). ....</b>                                 | <b>52</b> |
| <b>Figura 3.21</b> | <b>Conversor matricial.....</b>                                                                                                                                                                      | <b>53</b> |
| <b>Figura 3.22</b> | <b>Estratégia proposta por (Aouzellag, et al., 2006) utilizando o conversor<br/>matricial.....</b>                                                                                                   | <b>55</b> |
| <b>Figura 3.23</b> | <b>Modulação indireta do conversor matricial .....</b>                                                                                                                                               | <b>56</b> |
| <b>Figura 3.24</b> | <b>Resultado das simulações em (Aouzellag, et al., 2006).....</b>                                                                                                                                    | <b>58</b> |
| <b>Figura 3.25</b> | <b>Parâmetros do experimento de (Aouzellag, et al., 2006).....</b>                                                                                                                                   | <b>59</b> |

## **LISTA DE TABELAS**

|                   |                                                                  |           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabela 3.1</b> | <b>Parâmetros de simulação de (Kharchouf, et al., 2017).....</b> | <b>35</b> |
| <b>Tabela 3.2</b> | <b>Parâmetros do experimento de (Chabani, et al., 2017).....</b> | <b>38</b> |
| <b>Tabela 3.3</b> | <b>Comutação padrão do conversor de 9 chaves .....</b>           | <b>40</b> |
| <b>Tabela 3.4</b> | <b>Parâmetros do experimento de ( Ganti, et al., 2012).....</b>  | <b>49</b> |
| <b>Tabela 3.5</b> | <b>Comparação das topologias descritas no trabalho .....</b>     | <b>62</b> |

# SUMÁRIO

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                         | <b>14</b> |
| <b>1.1. Justificativa .....</b>                                    | <b>14</b> |
| <b>1.2. Objetivos .....</b>                                        | <b>15</b> |
| 1.2.1. Objetivo Geral.....                                         | 15        |
| 1.2.2. Objetivos Específicos.....                                  | 15        |
| <b>1.3. Organização do Trabalho (Resumo dos capítulos):.....</b>   | <b>15</b> |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                               | <b>16</b> |
| <b>2.1. Histórico da Geração eólica .....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>2.2. Geração eólica no Brasil .....</b>                         | <b>17</b> |
| <b>2.3. Vantagens e desvantagens da geração eólica .....</b>       | <b>19</b> |
| <b>2.4. Aerogeradores .....</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>2.5. Sistemas de controle .....</b>                             | <b>25</b> |
| 2.5.1. Controle Vetorial .....                                     | 25        |
| • Transformação de Clarke.....                                     | 26        |
| • Transformação de Park.....                                       | 27        |
| 2.5.2. Diagrama de blocos.....                                     | 28        |
| <b>3. REVISÃO DE TOPOLOGIAS APLICADAS AO DFIG .....</b>            | <b>30</b> |
| <b>3.1. Topologias aplicadas ao DFIG para geração eólica .....</b> | <b>30</b> |
| <b>3.2. Conversor back-to-back.....</b>                            | <b>30</b> |
| 3.2.1. Princípios básicos do conversor Back-to-Back .....          | 30        |
| 3.2.2. Trabalhos relacionados aos conversores back-to-back .....   | 32        |
| 3.2.3. Vantagens do back-to-back.....                              | 38        |
| 3.2.4. Desvantagens do back-to-back.....                           | 39        |
| <b>3.3. Conversor 9 chaves .....</b>                               | <b>39</b> |
| 3.3.1. Princípios básicos.....                                     | 39        |
| 3.3.2. Trabalho relacionado ao conversor de 9 chaves.....          | 42        |
| 3.3.3. Vantagens do Conversor 9 Chaves .....                       | 44        |
| 3.3.4. Desvantagens do Conversor 9 Chaves.....                     | 44        |
| <b>3.4. Conversor Back-To-Back com banco de bateria .....</b>      | <b>45</b> |
| 3.4.1. Princípios de funcionamento .....                           | 45        |
| 3.4.2. Trabalho relacionado .....                                  | 46        |

|             |                                                         |           |
|-------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.3.      | Vantagens do back-to-back com banco de bateria.....     | 52        |
| 3.4.4.      | Desvantagens do back-to-back com banco de bateria ..... | 53        |
| <b>3.5.</b> | <b>Conversor matricial .....</b>                        | <b>53</b> |
| 3.5.1.      | Princípios do conversor matricial.....                  | 53        |
| 3.5.2.      | Trabalho relacionado ao conversor matricial.....        | 54        |
| 3.5.3.      | Vantagens do conversor matricial .....                  | 59        |
| 3.5.4.      | Desvantagens do conversor matricial .....               | 59        |
| <b>3.6.</b> | <b>Resumo da revisão de literatura.....</b>             | <b>59</b> |
| <b>4.</b>   | <b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>                          | <b>63</b> |
| <b>5.</b>   | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                               | <b>64</b> |

---

## 1. INTRODUÇÃO

---

Devido à preocupação com a emissão de gases do efeito estufa e ao aquecimento global, foram necessárias buscas por energia limpa e renovável. Assim surgiu a geração eólica, que é obtida através do vento. Em regiões onde não é acessível a conexão à rede elétrica convencional, a energia eólica se tornou uma alternativa (Silva, 2012).

Devido ao alto custo de implantação inicial, tornou-se necessário o investimento governamental para que empresas pudessem utilizá-la. Em 2001, foi criado o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) a fim de incentivar a contratação de empreendimentos de energia eólica no país, porém não obteve resultados e foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia Elétrica (ABEEOLICA, 2018).

Em 2010, as usinas de geração eólica eram vistas como “experimento” do setor eólico, a capacidade instalada era menor do que 1 GW e quase uma década depois pôde se transformar na segunda maior fonte geradora de energia do Brasil (Gannoum, 2018).

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Apesar do crescimento significativo ocorrendo com o setor eólico no Brasil, este setor apresenta grandes blocos de geração localizados à grandes distâncias dos centros de carga requerendo robustos sistemas de transmissão para escoamento da potência gerada.

Devido à variabilidade da direção e da velocidade dos ventos, a geração eólica envolve um certo nível de incertezas necessitando de ações em tempo real para o controle dos intercâmbios entre áreas e do balanço carga/geração. As fontes de energia renováveis no Brasil, complementam a principal geração elétrica do país, hidrelétricas, nos períodos em que os reservatórios apresentam um nível baixo devido à falta de chuvas.

Com esse avanço da geração eólica no país, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos para obter maior aproveitamento desta energia. Devido aos problemas apresentados na conexão dos aerogeradores à rede elétrica, como problemas de controle de reativo e tensão, torna-se necessário a realização de estudos a fim de analisar diferentes topologias dos conversores eletrônicos de potência utilizados com o gerador de indução duplamente alimentado aplicado à geração eólica.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. *Objetivo Geral*

Analisar, por meio de revisão de literatura, as topologias mais utilizadas do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (*Doubly Fed Induction Generator* - DFIG) para utilização na geração eólica.

### 1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Realizar estudo sobre a geração eólica;
- Analisar a turbina eólica bem como seu comportamento;
- Analisar as topologias de conversores aplicados com o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG) na geração eólica por meio de revisão de literatura;
- Avaliar as vantagens e desvantagens de cada topologia para permitir determinar as mais adequadas em cada aplicação;

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO (RESUMO DOS CAPÍTULOS):

O trabalho foi dividido em 4 capítulos: No capítulo 1, foi apresentada uma introdução sobre a geração eólica, os objetivos do trabalho e a justificativa do tema; No capítulo 2, foi feita uma sucinta apresentação da geração eólica e seus componentes; No capítulo 3, foram analisadas topologias dos conversores eletrônicos de potência utilizados com o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG) conectado à turbina eólica; No capítulo 4, apresenta uma sucinta conclusão a respeito dos artigos revisados no capítulo 3.

## **2 . FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

---

### **2.1. . HISTÓRICO DA GERAÇÃO EÓLICA**

Sabe-se que o princípio da geração da energia eólica teve grande utilização pelo homem, por volta do século V, com o uso dos moinhos de vento para o bombeamento de água e moagem de grãos, a fim de substituir o trabalho antes feito pelo homem (Silva, 2012).

Alguns autores alegam terem descoberto os restos de um moinho de vento no Egito com idade de 3000 anos, porém não há nenhuma prova convincente de que egípcios, gregos ou romanos tinham conhecimento dos moinhos de vento. O primeiro moinho de vento utilizado para produção de energia elétrica foi construído na Escócia, em 1887, pelo professor Jaes Blyth, numa torre de 10 metros no jardim de sua casa. Nos séculos V a XV, a geração eólica começa a ser utilizada pelos holandeses para drenagem de regiões alagadas bem como, para utilização na navegação (Nunes, 2019) (Energia, 2017).

Durante o século XIX, surgiu a ideia de gerar energia a partir dos ventos, porém concomitantemente, foram encontradas grandes reservas de petróleo ocasionando um declínio da geração eólica, tendo grande utilização em áreas rurais onde não havia acesso à rede elétrica (Simas, 2012).

Com o aumento do preço do petróleo, cerca de 1973, surgiram programas de desenvolvimento para a obtenção de fontes renováveis de energia. Em 1990, o estudo de energias renováveis se fez necessário devido à preocupação ambiental ocasionada pelo aquecimento global (Simas, 2012).

A busca por alternativas que reduzissem os problemas econômicos gerando um menor impacto ambiental, se intensificou após a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997. O investimento em fontes renováveis de energia foi uma das medidas tomadas, no qual, a

energia eólica teve destaque por oferecer uma redução significativa de emissão de gases do efeito estufa (Simas, 2012).

Após a crise financeira de 2008, o mercado de energia eólica na Europa e nos Estados Unidos, teve redução significativa resultando em uma diminuição do investimento nessa tecnologia em 2010.

De acordo com o Indicador de Eficiência Energética de 2018, 59% das organizações em nível global planejam aumentar seus investimentos em soluções de eficiência energética, sendo a Alemanha o país que mais apontou investimento nessa área, segundo (Nunes, 2019).

## **2.2. GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL**

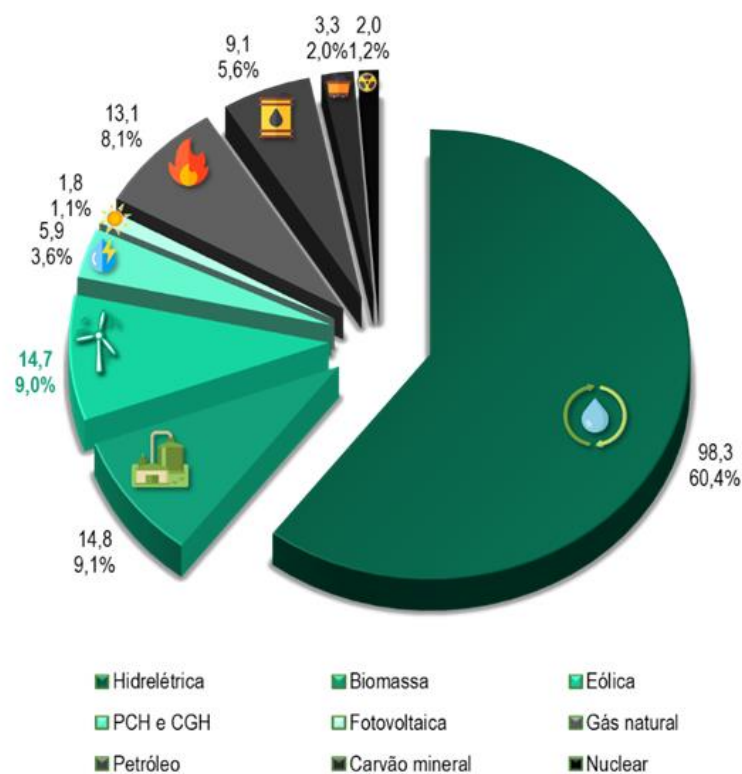
Em 1992, em Fernando de Noronha, foi instalado o primeiro aerogerador do Brasil resultado da parceria do Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) financiado pelo instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter (ABEEOLICA, 2018).

Com a expansão da energia eólica no Brasil, o governo gerou incentivos para empresas investirem no setor eólico, como a isenção de ICMS, até 2021, para operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias fotovoltaica e térmica.

Adicionalmente, decretou-se a lei federal nº 13.097/2015 que reduz a zero as alíquotas da Contribuição para o PIS/PASEP, da COFINS, da Contribuição para o PIS/Pasep-Importação e da COFINS-Importação incidentes sobre a receita de vendas e na importação de partes utilizadas em aerogeradores. (Brasil, 2015)

Nos últimos anos, houve um crescimento na geração eólica no Brasil devido à presença de ventos estáveis sem mudanças bruscas de velocidade e direção. Hoje, a capacidade instalada chega a 14,71 GW de energia eólica com 583 parques eólicos e mais de 7.000 aerogeradores em 12 estados, de acordo com (Roberto, 2019). A Figura 2.1 se refere à matriz energética do país.

Figura 2.1 Matriz energética do Brasil



Fonte: ( Roberto, 2019)

No Brasil, a geração eólica prevalece nos estados do Nordeste e Sul do país. Segundo o ministro de Minas e Energia, Eduardo Braga,

**“O vento brasileiro está predominantemente localizado na parte setentrional do Nordeste, com potencial identificado de 300 gigawatts”**

Portanto, levando a um investimento significativo nessa região. (Barifouse & Schreiber, 2015)

Gradativamente, as empresas internacionais estão investindo no setor eólico no Brasil devido aos incentivos governamentais. Diversos fornecedores mundiais de aerogeradores de grande porte têm sido atraídos para o país motivados pelo acesso ao financiamento do BNDES para compra de máquinas. Atualmente no Brasil, existem 7 montadoras de aerogeradores

sendo a GE, Vestas, Acciona e Alstom as 4 maiores fabricantes do país. A GE conta com 450 turbinas eólicas no Brasil com o total de 1 GW de capacidade instalada e a Alstom assinou mais de 1700 MW em contratos de aerogeradores no país. (ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2014)

Segundo (Simas, 2012), diante desta rápida expansão do setor eólico no Brasil, é de suma importância a avaliação do impacto que esta fonte renovável pode trazer para a economia brasileira, de modo a oferecer uma base para a criação de gestão de políticas energéticas avaliando seu potencial de contribuição para o desenvolvimento sustentável.

### **2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GERAÇÃO EÓLICA**

De acordo com (ABEEolica, 2018), os benefícios socioambientais da geração eólica são:

- Por ser uma energia obtida por uma fonte renovável, vento, possui baixo impacto ambiental em sua instalação e operação, pois os parques eólicos não emitem CO<sub>2</sub> contribuindo para que o Brasil cumpra seus objetivos no Acordo de Paris.
- Possui uma das melhores relações custo-benefício na tarifa de energia, apresentando os preços mais baixos;
- Permite a realização de outras atividades, como plantações ou criações de animais, no mesmo local do parque eólico;

E possui as seguintes desvantagens, de acordo com (Reis, 2019):

- Poluição visual devido à sua instalação em parques;
- Poluição sonora proveniente dos equipamentos;
- Impactos sobre a fauna, as aves podem colidir com as hélices;

### **2.4. AEROGERADORES**

Os ventos são causados pelo aquecimento da atmosfera que ocorre devido à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. As regiões tropicais são mais aquecidas do que as regiões polares, consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, e a massa de ar fria das regiões polares, descem.

Esse deslocamento de massas de ar determina a formação de ventos. (CEPEL/CRESESB, 2008)

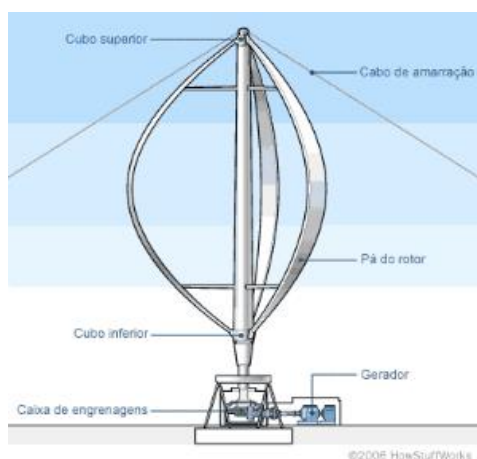
Os ventos planetários, são aqueles em que não cessam pois encontram-se numa região do globo terrestre em que há a presença constante do aquecimento no equador e o resfriamento nos polos. Os ventos continentais, monções e brisas, são resultantes das variações sazonais da distribuição de radiação recebida na superfície da Terra. E os ventos locais, são resultantes das condições locais que os tornam individualizados, e são observados em vales e montanhas. (CEPEL/CRESESB, 2008)

Para a instalação de turbinas eólicas, deve-se levar em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento, como por exemplo: a rugosidade do solo, o relevo que pode causar aceleração ou desaceleração no escoamento do ar, a variação da velocidade com a altura e a presença de obstáculos nas redondezas. (CEPEL/CRESESB, 2008)

Os aerogeradores são máquinas que convertem energia cinética do vento em energia mecânica, gerando energia elétrica através do acoplamento com geradores. E são classificadas:

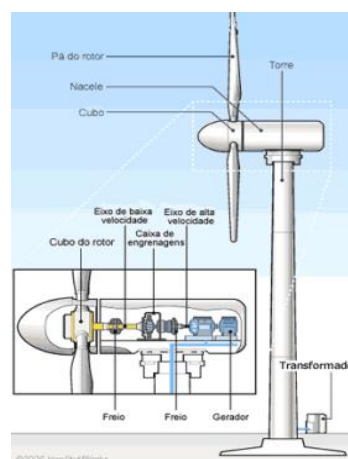
- Quanto à forma construtiva: de Eixo Horizontal (TEEH) ou de Eixo Vertical (TEEV) como ilustram a Figura 2.3 e Figura 2.2 respectivamente.

Figura 2.2 Turbina de eixo vertical



Fonte: (Anon., 2013)

Figura 2.3 Turbina de eixo horizontal



Fonte: (Mosqueira Rodrigues Lopes, 2016)

As turbinas de eixo horizontal são as mais usuais, e podem controlar a potência extraída do vento pelo rotor se possuírem ajuste da inclinação das pás. As turbinas de eixo vertical não necessitam de um sistema de orientação conforme a direção do vento.

- Quanto à sua potência nominal: pequeno porte (até 50 kW de potência), médio porte (de 50 kW a 1 MW) e de grande porte (acima de 1 MW);

As turbinas de pequeno porte são utilizadas em residências e regiões remotas, as de médio porte são utilizadas na geração distribuída e em sistemas híbridos, enquanto que as de grande porte, são utilizadas em parques eólicos.

- Quanto à operação do gerador: sistemas isolados, sistemas interligados à rede elétrica e sistemas híbridos;

Os sistemas isolados são utilizados em regiões onde não se encontra rede elétrica disponível, e são utilizados para alimentar residência rural ou uma fazenda. Necessitam de um banco de baterias para armazenamento de energia, um inversor para alimentação das cargas e um sistema de controle para operação otimizada. Os sistemas eólicos interligados a rede elétrica são constituídos por usinas de geração eólica de grande porte, não necessitam de armazenadores de energia pois injetam na rede elétrica toda energia gerada. Os sistemas híbridos são destinados a atender um número maior de usuários, operam com a presença de uma turbina eólica em paralelo com outra fonte de geração de energia elétrica. É necessário um controle de carga e condicionamento de potência para um melhor aproveitamento de energia gerada. O sistema híbrido é formado pelo aerogerador, painel fotovoltaico e gerador-diesel. (Silva, 2012)

O sistema de geração eólico é constituído basicamente por 3 componentes:

- Um rotor, ao qual estão acopladas as hélices ou pás;
- Uma torre de suporte;
- Nacele, na qual se encontra o gerador, que converte torque em energia elétrica.

- **Rotor**

O rotor é constituído de uma pá e contrapeso, duas pás ou múltiplas pás. As pás podem ter vários formatos e serem de diversos materiais, podendo ser de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

- **Torre**

A torre tem como função a sustentação e posicionamento do rotor e da nacele. Sua altura tem grande importância, tanto por questões financeiras quanto para a produção de energia, uma vez que a velocidade do vento aumenta proporcionalmente com a altura. (Mosqueira Rodrigues Lopes, 2016)

A Figura 2.4 ilustra os componentes internos da torre cônica, que incluem as escadas, elevadores, plataformas, suportes, *guard-rails*, etc.

Figura 2.4 Componentes internos da torre cônica



Fonte: (ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2014)

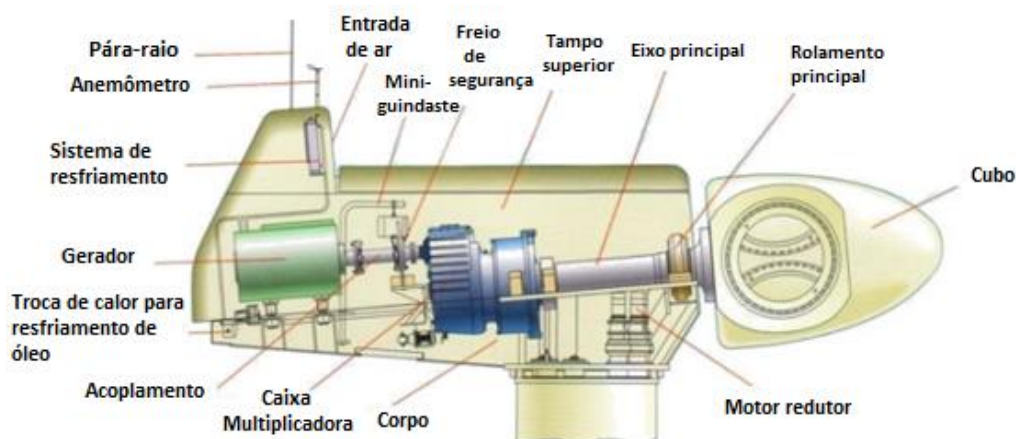
- **Nacele**

A nacele é a carcaça montada sobre a torre a qual contém: eixo, gerador, caixa multiplicadora, transformador, sistema de *Yaw*, etc.

O eixo principal é o responsável pelo acionamento do gerador, transferindo a energia mecânica da turbina. O gerador converte energia mecânica da rotação em energia elétrica e necessita de conversores de frequência para controle da onda de saída. O transformador possui a função de elevar a tensão de geração para o valor de tensão da rede elétrica à qual o aerogerador está conectado, e pode ser instalado no interior da nacele ou no interior da torre. O sistema de *Yaw* tem a função de alinhar a turbina com o vento, compreendendo um motor

elétrico que gira a nacele sobre a torre com o auxílio de um enrolamento e engrenagens para o ajuste da velocidade de giro. (ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2014). A Figura 2.5 apresenta os componentes da turbina de eixo horizontal.

Figura 2.5 Componentes da turbina de eixo horizontal



Fonte: Adaptado de ( Wenzel , 2007)

Na maioria das máquinas a velocidade do eixo que transmite o torque das pás é de baixa rotação, sendo assim é necessário aumentar a rotação utilizando uma caixa multiplicadora de rotação. A caixa é conectada ao gerador elétrico que é responsável pela conversão da energia mecânica em elétrica. ( Wenzel , 2007)

Conectada ao rotor, a caixa multiplicadora possui a função principal de transmitir a energia mecânica extraída pelo rotor até o gerador, adequando a velocidade de rotação do rotor com a velocidade de rotação do gerador. O sistema é formado por eixos, mancais, engrenagens e acoplamentos. Há modelos de aerogeradores que não possuem relação de transmissão, ao invés disso, são utilizados geradores múltiplos de baixa velocidade. (Mosqueira Rodrigues Lopes, 2016)

Há um sistema de controle com a função de equilíbrio do sistema eólico, utilizando freios, para situações em que a velocidade do vento é alta, impedem o colapso decorrente das forças envolvidas atuando no posicionamento do rotor e controle da carga. São utilizados dois tipos de controle: *Stall* ou *Pitch*.

No controle por *Stall*, que reage à velocidade do vento, há um desprendimento do fluxo de vento no perfil aerodinâmico, gerando vórtices e assim aumentando o arrasto e diminuindo a velocidade angular. ( Wenzel , 2007)

No controle por *Pitch*, que reage em obediência à informação do controlador do sistema, ao detectar que a potência nominal do gerador é ultrapassada, as pás da turbina mudam o seu ângulo de passo posicionando-se perpendicularmente ao vento, diminuindo a sustentação aerodinâmica e consequentemente, a rotação do rotor.

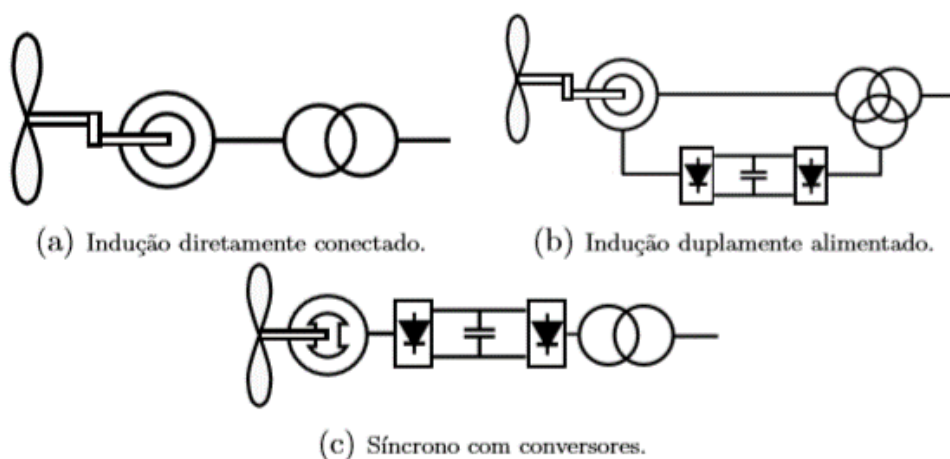
Conforme dito, o gerador é o responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica, e é necessário que haja sistemas de controle para que a máquina possa ser conectada à rede elétrica. A necessidade de um controle em aerogeradores se dá devido à: variações da velocidade do vento e variações do torque de entrada.

Os geradores para conversão de energia eólica mais utilizados são:

- Gerador de Indução Diretamente Conectado;
- Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG);
- Gerador Síncrono de Imã Permanente (PMSG);

A configuração de cada um para conexão ao sistema eólico está ilustrada na Figura 2.6.

Figura 2.6 Geradores eólicos mais utilizados



Fonte: ( Carlos Vilella do Carmo Dobbi, 2014)

De acordo com (da Silva, 2006), o gerador de indução diretamente conectado permite a configuração da turbina eólica em velocidade fixa através do acoplamento de uma caixa de

transmissão. Sendo a velocidade do gerador fixa pela frequência da rede, podendo variar de acordo com a faixa de escorregamento da região linear de torque da máquina de indução.

O gerador de indução duplamente alimentado permite a operação da turbina eólica em velocidade variável, e neste sistema o estator da máquina é ligado diretamente à rede enquanto o rotor é alimentado por um conversor estático. A potência do conversor é em função da variação do escorregamento da máquina pois esta, pode operar com escorregamento positivo ou negativo. Esta configuração possui grandes vantagens devido à sua flexibilidade operacional, pois permite o controle do fluxo de potência ativa e reativa entre o gerador e a rede com um conversor com potência 30% da máquina, reduzindo o custo dos equipamentos.

O gerador síncrono de ímãs permanentes permite a configuração em velocidade variável, porém com uma grande quantidade de polos eliminando a necessidade da caixa de transmissão e a velocidade do vento é limitada pelo controle do ângulo de passo das pás. A vantagem desta configuração é seu controle ser mais simples em comparação com às anteriores.

As topologias de conversores mais utilizadas para o uso do gerador de indução duplamente alimentado consistem na utilização do conversor *back-to-back*, conversor de 9 chaves e conversor matricial. Estas topologias serão revisadas no Capítulo 3.

## 2.5. SISTEMAS DE CONTROLE

A topologia utilizando o gerador de indução duplamente alimentado necessita de um conversor eletrônico de potência para controle do fluxo de potências ativa e reativa entre o gerador e a rede. Para isso é necessário um sistema de controle utilizando o Diagrama de Blocos e o Controle Vetorial.

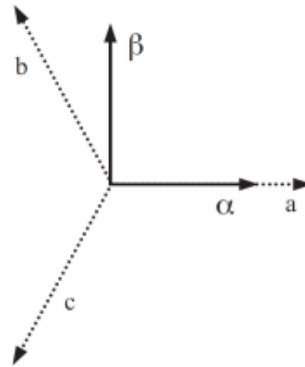
### 2.5.1. Controle Vetorial

Para uma estratégia de controle vetorial em cada conversor é necessária a transformação para o eixo síncrono ( $dq$ ) a fim de simplificar a modelagem matemática e para isso, são realizadas as transformações de Clarke e Park.

- **Transformação de Clarke**

Uma forma de reduzir a ordem do modelo matemático sem perdas de informação é utilizando a transformação de Clarke, chamada também de  $\alpha\beta 0$ , na qual os valores instantâneos de uma variável na coordenada  $abc$  são mapeadas nos eixos estacionários  $\alpha\beta 0$  transformando uma estrutura trifásica em uma bifásica, como demonstra a 26.

Figura 2.7 Representação gráfica da transformação de Clarke



Fonte: ( Crispim, 2018)

A transformação linear direta e inversa podem ser descritas na matriz da Equação 2.1 e Equação 2.2:

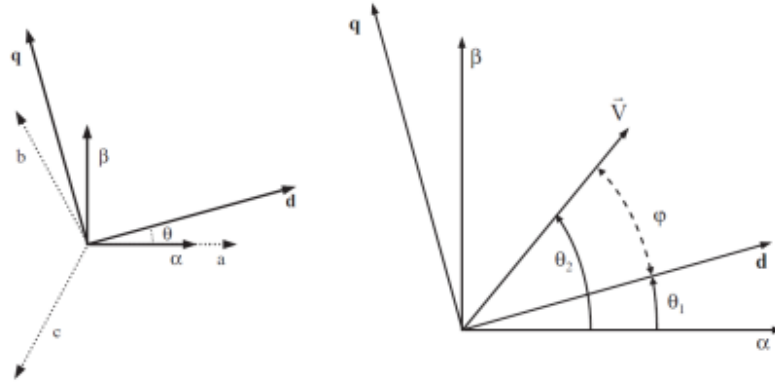
$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

- **Transformação de Park**

Através da transformação de Park é possível representar um sistema trifásico em um sistema de coordenadas girante sincronizado com a frequência da rede elétrica, como ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 Representação gráfica da transformação de Park



Fonte: ( Crispim, 2018)

O referencial  $dq$  gira em torno do referencial  $\alpha\beta$  com uma frequência angular  $\omega$  constante, assim  $\theta = \omega t$ . Os sinais ortogonais resultantes da transformação de Clarke podem ser interpretados geometricamente como um vetor rotórico  $\vec{V}$  que possui velocidade angular igual a frequência angular do sinal trifásico original. Se a frequência angular  $\omega$ , com que os eixos  $d$  e  $q$  giram, for igual a velocidade do vetor  $\vec{V}$ , o ângulo  $\phi$  será constante, assim como a projeção do vetor  $\vec{V}$  sobre os eixos  $d$  e  $q$ . Portanto, um sinal de corrente nas coordenadas  $abc$  será visto como duas constantes nas coordenadas  $dq$ . ( Crispim, 2018)

A transformação de Park direta e inversa é descrita na Equação 2.3 e Equação 2.4.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

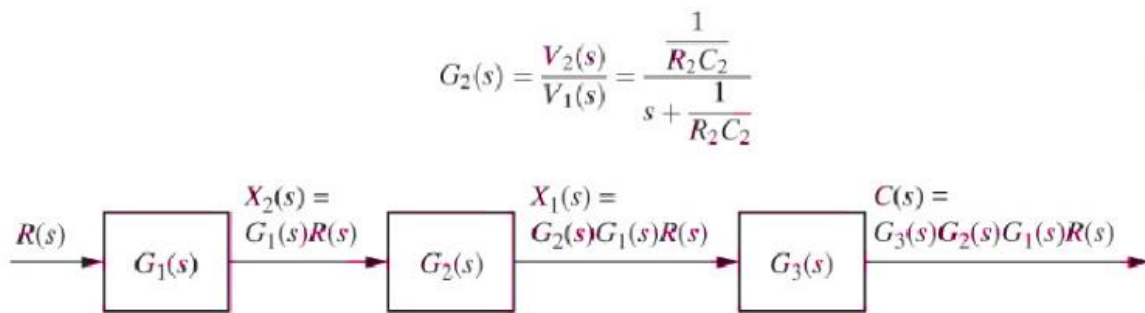
$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

### 2.5.2. Diagrama de blocos

O Diagrama de Blocos é uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada componente e o fluxo de sinais entre eles. São associados à operação de multiplicação entre a entrada do bloco e a função de transferência correspondente ao bloco, produzindo a saída. A transformação de diagramas de blocos permite a simplificação de diagramas complexos, podendo-se obter um diagrama que relaciona diretamente a variável de entrada e a de saída.

Os subsistemas de um Diagrama de Blocos podem se conectar em cascata, em paralelo e com realimentação. Na conexão em cascata, cada sinal é obtido pelo produto da entrada pela função de transferência. A Figura 2.9 mostra um subsistema em cascata.

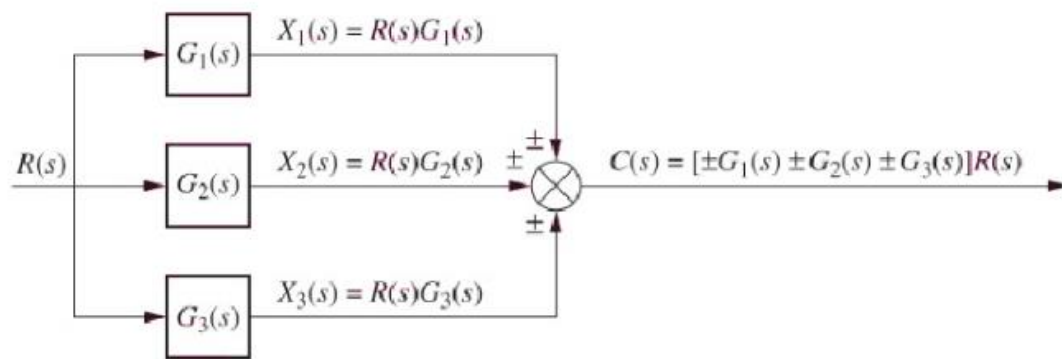
Figura 2.9 Subsistema em cascata



Fonte: Adaptado de (Nise, 2013)

Os subsistemas em paralelo possuem uma entrada comum e uma saída formada pela soma algébrica das saídas de todos os subsistemas. A Figura 2.10 mostra um subsistema em paralelo.

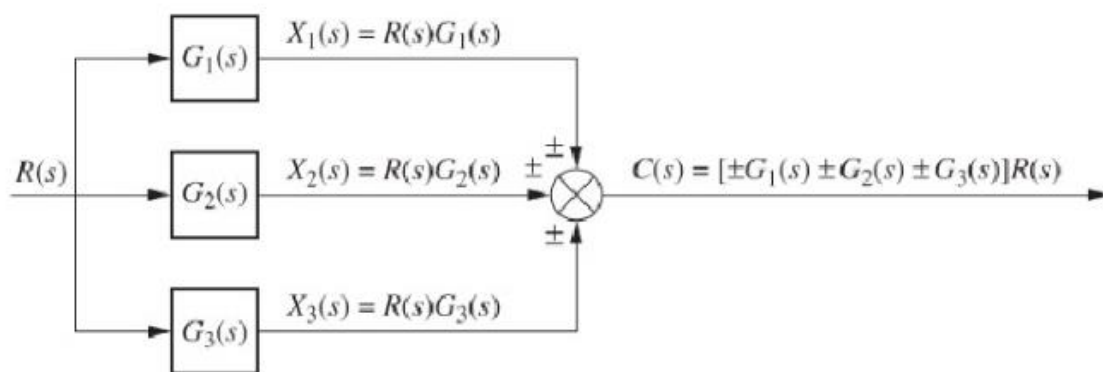
Figura 2.10 Subsistema em paralelo



Fonte: Adaptado de (Nise, 2013)

E a Figura 2.11 mostra um sistema de controle com realimentação.

Figura 2.11 Sistema de controle com realimentação



Fonte: Adaptado de (Nise, 2013)

---

### 3. REVISÃO DE TOPOLOGIAS APLICADAS AO DFIG

---

O gerador de indução duplamente alimentado vem sendo muito utilizado em turbinas eólicas por permitir a operação em velocidade variável através da inserção de um conversor de potência no circuito do rotor. Diferentes circuitos podem ser utilizados e este capítulo irá tratar detalhadamente os principais encontrados na literatura, comparando suas vantagens e desvantagens para permitir a escolha em diferentes aplicações.

#### 3.1. TOPOLOGIAS APLICADAS AO DFIG PARA GERAÇÃO EÓLICA

Os conversores utilizados no DFIG são normalmente ligados no lado do rotor, para permitir o processamento de uma potência menor do que a nominal do gerador. Esta é a principal vantagem do DFIG em relação aos geradores de indução com rotor tipo gaiola. Para controle da potência ativa e reativa do gerador, é necessário um conversor com 30% de potência nominal do gerador. Nesta seção serão apresentadas e referenciadas as principais topologias estudadas, que são: *Back-to-Back*, *Back-to-Back* com banco de baterias, *Inversor* com 9 chaves e matricial.

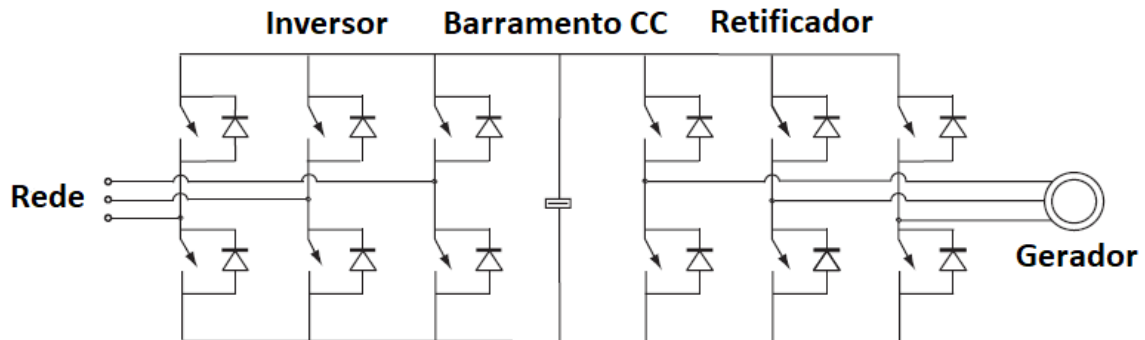
#### 3.2. CONVERSOR BACK-TO-BACK

##### 3.2.1. Princípios básicos do conversor *Back-to-Back*

O conversor *back-to-back* consiste em dois conversores que são inversores fonte de tensão (*Voltage Source Inverter – VSI*) interligados através de um barramento CC: o conversor 1 (*Rotor Side Converter – RSC*), que controla a potência ativa e reativa no circuito do rotor, e o conversor 2 (*Grid Side Converter – GSC*), que regula o barramento CC e controla o fator de potência entre o circuito rotórico e a rede elétrica. A tensão no barramento CC é mais elevada que a tensão no lado CA, permitindo um fluxo bidirecional de potência ativa e reativa. (Crispim, 2018)

A Figura 3.1 apresenta a topologia do conversor *back-to-back* conectando o gerador à rede.

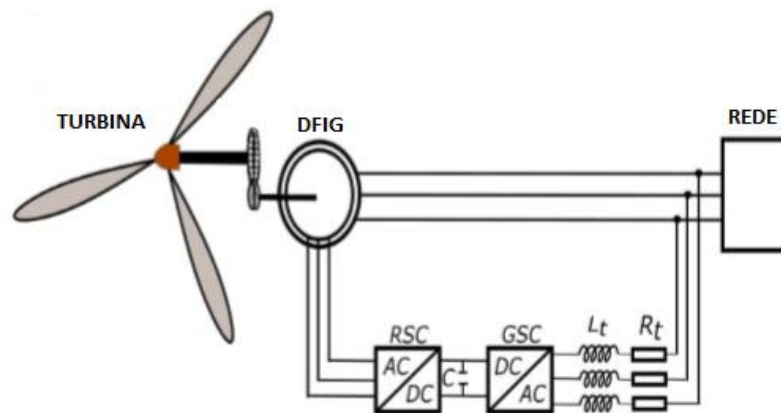
Figura 3.1 Conversor Back-to-Back conectado à rede e ao gerador



Fonte: Adaptado de (Carvalho, 2010)

A maioria das aplicações do conversor *back-to-back* com o gerador de indução duplamente alimentado, possui um controle interno de corrente e a técnica mais utilizada está no uso do controlador PI no referencial síncrono  $dq$ . Para essa técnica, a corrente CA medida no referencial  $abc$  é transformada em uma variável CC no referencial síncrono  $dq$  utilizando as Transformações de Clarke e Park. Esse processo, de acordo com (Crispim, 2018), é vantajosa já que é possível representar um sistema trifásico com variáveis senoidais como constantes.

Aplicado com o gerador de indução duplamente alimentado, o conversor *back-to-back* é conectado de acordo com a Figura 3.2.

Figura 3.2 Conversor *back-to-back* aplicado com DFIG em uma turbina eólica.

Fonte: (Chabani, et al., 2017)

### 3.2.2. Trabalhos relacionados aos conversores *back-to-back*

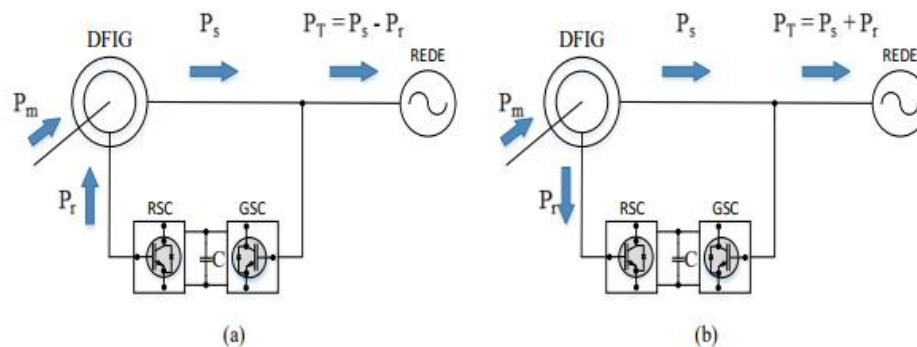
Em (Kharchouf, et al., 2017), foram realizadas duas simulações, modo subsíncrono e modo super-síncrono, com o gerador DFIG e *back-to-back* mediante a variações da velocidade do vento. A estratégia de controle utilizada permite manter constante a tensão do capacitor do link-CC, controlar o fator de potência e extrair a máxima potência através de MPPT (Maximum Power Point Tracking - Rastreador do Ponto de Máxima Potência). O conversor ao lado do rotor (RSC) controla a potência ativa e reativa da máquina e o conversor do lado da rede (GSC) controla a tensão do link-CC e o fator de potência da rede.

Para verificar a operação da máquina nos modos subsíncrona e super-síncrona, foram impostas duas velocidades do vento em uma mesma simulação:

- Velocidade do vento  $v_1 = 7$  m/s no instante de tempo entre 0 e 1 segundo;
- Velocidade do vento  $v_2 = 13$  m/s no instante de tempo entre 1 e 2 segundos;

Antes dos resultados da simulação, é necessário um entendimento acerca da região de operação do gerador nas velocidades subsíncrona e super-síncrona. Como ilustra a 0, quando o gerador opera no modo subsíncrono, o escorregamento da máquina é positivo e o rotor está consumindo potência da rede. No modo de operação super-síncrono, o escorregamento é negativo e o rotor está fornecendo potência

Figura 3.3 Modos de operação do gerador de indução. (a) Velocidade subsíncrona e (b) Velocidade supersíncrona.



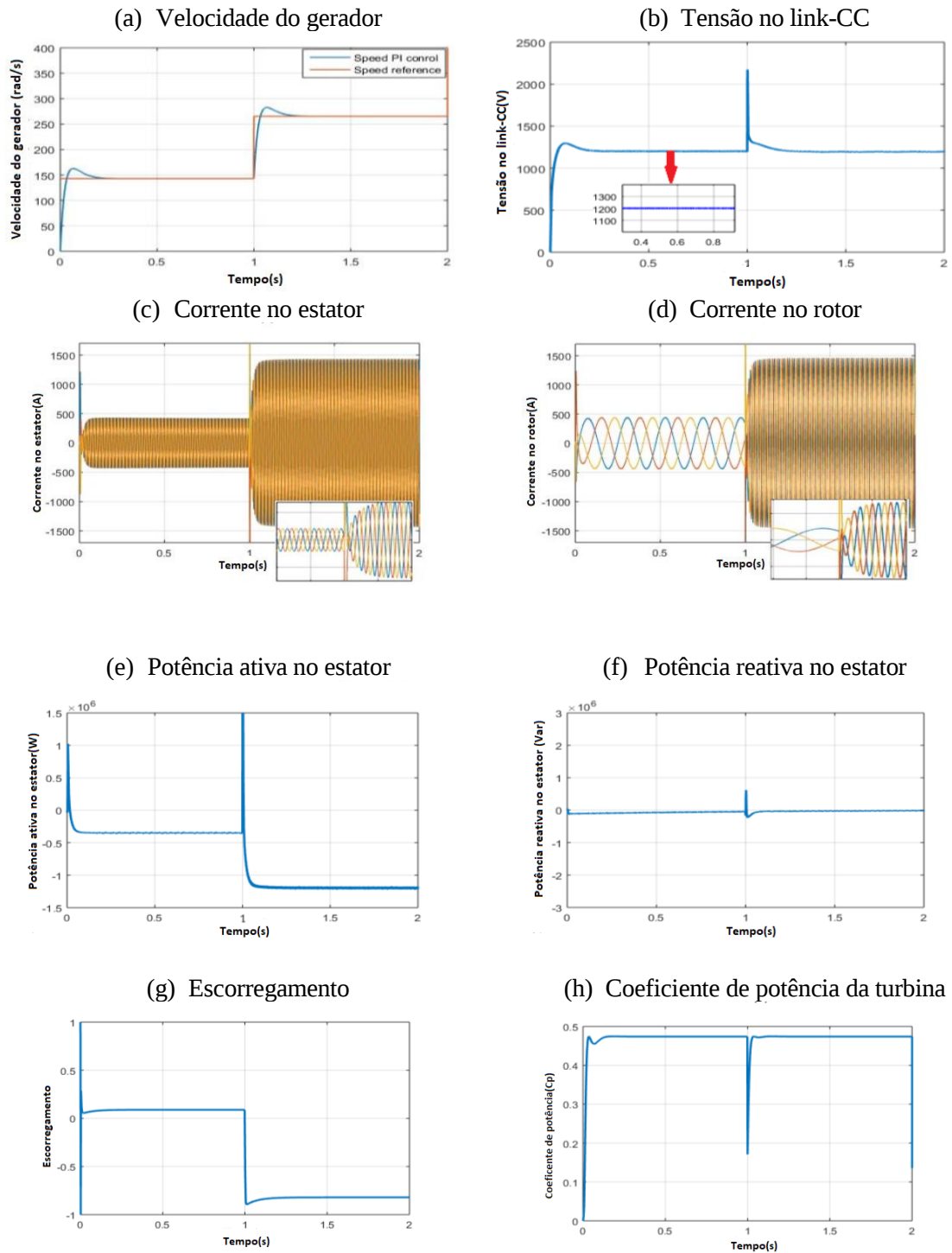
Fonte: (Rocha, 2018)

Como ilustra a Figura 3.4(a), a velocidade do gerador aumenta no instante de tempo igual a 1 segundo à proporção que a velocidade do vento aumenta. Como ilustrado pela Figura 3.4 (b), a tensão do link-CC foi mantida a 1200 V apesar das variações de potência que passam da rede ao rotor no período de 0 a 1 segundo, e do rotor à rede no período de 1 a 2 segundos.

Pela Figura 3.4 (c), pode-se verificar que a intensidade das correntes do estator variam com o aumento na velocidade do vento. Com a Figura 3.4(d), nota-se que há uma variação da frequência e magnitude da corrente no rotor de acordo com a velocidade do gerador. Com a Figura 3.4 (e), pode-se notar que a potência ativa no estator é negativa no período após 1 segundo. Na Figura 3.4 (f), pode-se notar que a potência reativa é próxima de zero para manter o fator de potência unitário, isto implica que o controle das correntes no rotor foi bem sucedido. Na Figura 3.4 (g), o escorregamento da máquina é positivo (modo subsíncrono) de 0 a 1 segundo, e no período de 1 a 2 segundos, o valor passa a ser negativo devido à transição da máquina no modo de operação subsíncrono ao modo de operação supersíncrono.

Na Figura 3.4 (h), é possível verificar o correto funcionamento do rastreamento do ponto de máxima potência, pois o coeficiente de potência da turbina atingiu o seu ponto máximo e manteve o valor constante mesmo após a mudança do modo de operação da máquina.

Figura 3.4 Resultados da simulação de (Kharchouf, et al., 2017)



Fonte: Adaptado de (Kharchouf, et al., 2017)

Os parâmetros utilizados na simulação de (Kharchouf, et al., 2017) estão apresentados na Tabela 3.1, onde é possível verificar as principais características para aplicações neste nível de potência, como a tensão do *link-CC* e a tensão da rede.

Tabela 3.1 Parâmetros de simulação de (Kharchouf, et al., 2017)

|                | Parâmetro                        | Valor |
|----------------|----------------------------------|-------|
| <b>Turbina</b> | Número de pás                    | 3     |
|                | Raio da pá (m)                   | 35,25 |
|                | Ganho da caixa de transmissão    | 90    |
| <b>Gerador</b> | Potência nominal (MW)            | 1,5   |
|                | Tensão do estator e da rede (V)  | 690   |
|                | Número de polos                  | 2     |
|                | Frequência (Hz)                  | 50    |
| <b>Link-CC</b> | Capacitância (mF)                | 4,4   |
|                | Tensão do link-CC (V)            | 1200  |
|                | Resistência série do filtro (mΩ) | 12    |
|                | Indutância do filtro (mH)        | 5     |

Fonte: Dados obtidos em (Kharchouf, et al., 2017)

Em (Chabani, et al., 2017), foi implementado experimentalmente uma estratégia de controle do gerador de indução duplamente alimentado, com potência de 3 kW, com o conversor *back-to-back*, utilizando um DSP Dspace DS1104. O DFIG proposto é testado sob cargas R ou RL, com mudança repentina de cargas e velocidade variável do vento.

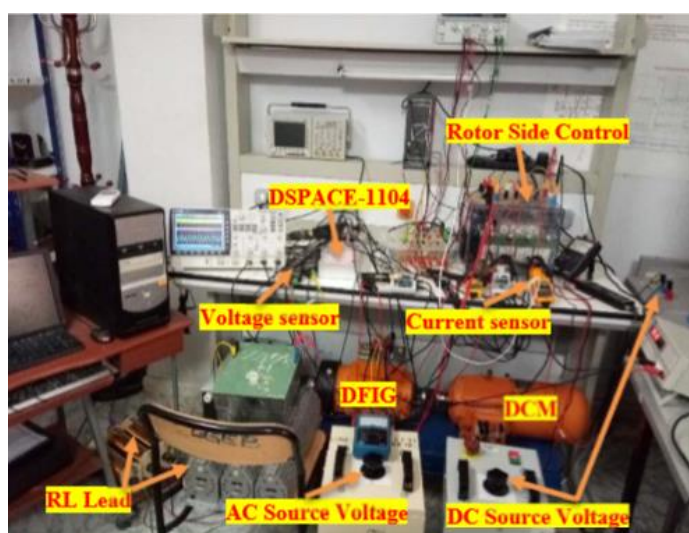
O trabalho proposto por (Chabani, et al., 2017) visa apenas o controle do conversor do lado do rotor (RSC), supondo que o conversor do lado da rede (GSC) mantém a tensão do *link-CC* constante. O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) foi modelado matematicamente com suas variáveis referenciadas no eixo síncrono (*dq*).

A estratégia de controle do conversor do lado do rotor (RSC) utilizando um controlador de corrente com comparador com histerese. A proposta de controle do RSC é manter a tensão e frequência constantes sob variação da velocidade do vento e variação de cargas. O RSC é controlado no referencial orientado pelo fluxo do estator, assim, a tensão de saída do estator é controlado regulando a corrente do rotor. A corrente do rotor de eixo direto é obtida processando o erro de tensão do terminal entre a referência e a tensão estimada pelo controlador PI.

O DFIG gera energia necessária pela carga já que não está na condição de MPPT, a velocidade da turbina é ajustada de forma a gerar a quantidade necessária de energia.

A topologia proposta foi implementada utilizando um motor CC (3 kW/1500 rpm) como a máquina primária. O gerador de indução duplamente alimentado utilizado é uma máquina de indução de rotor bobinado com 3 kW de potência. O estator é conectado à uma carga trifásica, carga resistiva de 4 kW, e o conversor do lado do rotor (RSC) é composto por transistores IGBT. A conexão entre o dSPACE e os IGBTs são realizados pelos *gate drivers*, que adaptam os sinais de controle. O algoritmo de controle é implementado pelo software *Matlab/Simulink*, o qual, realiza a interface com o DS1104. A Figura 3.5 ilustra o experimento implementado.

Figura 3.5 Fotografia do experimento implementado



Fonte: (Chabani, et al., 2017)

A fim de avaliar a estratégia de controle, o sistema foi analisado sob 3 condições de operação: mudança em degrau da tensão do estator, variação de carga e variação de velocidade do rotor próxima da velocidade síncrona.

Na primeira condição de operação, a máquina operou com velocidade de 1450 rpm. Então um degrau mudou a tensão do estator de 10 V a 200 V e vice-versa. A Figura 3.6 ilustra a resposta da tensão do estator ao degrau aplicado.

Figura 3.6 Degrau aplicado à tensão do estator.



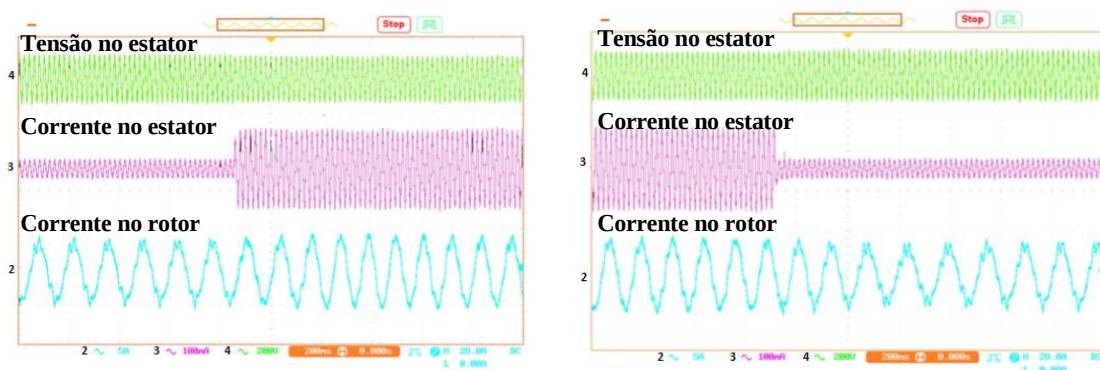
Fonte: Adaptado de (Chabani, et al., 2017)

Na segunda condição de operação, para testar a estratégia de controle, a carga, conectada ao *link-CC*, teve um aumento de 2 kW a 4 kW e após, houve uma redução de 4 kW a 2 kW. A resposta da variação de carga é mostrada na Figura 3.7

Figura 3.7 Resposta experimental à variação de carga em (Chabani, et al., 2017)

(a) Resposta ao aumento de carga

(b) Resposta à redução de carga



Fonte: Adaptado de (Chabani, et al., 2017)

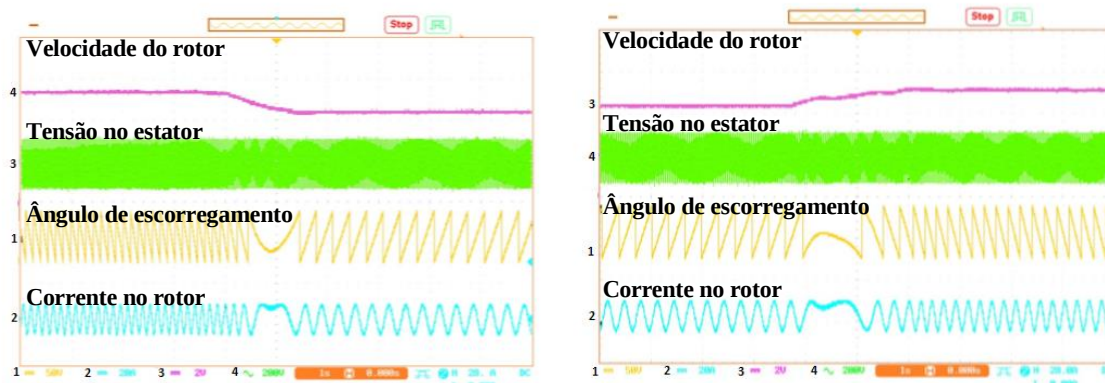
Na terceira condição de operação, a máquina operou com variação de velocidade de 1450 rpm a 1600 rpm (isto é, do modo subsíncrono ao modo super-síncrono), e vice-versa. A Figura 3.8 ilustra o desempenho dos controladores e do sistema durante mudança de

velocidade, tanto na velocidade subsíncrona quanto na velocidade super-síncrona são aplicadas para obter a tensão do estator igual a 200 V.

Figura 3.8 Resposta experimental à variação de velocidade em (Chabani, et al., 2017)

(a) Redução de velocidade (subsíncrono)

(b) Aumento de velocidade (super-síncrono)



Fonte: Adaptado e traduzida de (Chabani, et al., 2017)

Foi implementada uma estratégia de controle direto de tensão do estator para controlar a tensão e frequência das saídas do estator sob as perturbações causadas pela velocidade e variações de potência. Os resultados experimentais mostraram que o controle de histerese com comparador PI obteve resultado favorável sob diferentes condições de operação.

Tabela 3.2 Parâmetros do experimento de (Chabani, et al., 2017)

|                  | Parâmetro                 | Valor |
|------------------|---------------------------|-------|
| Gerador          | Potência do gerador (kW)  | 3     |
| Máquina primária | Potência do motor (kW)    | 3     |
|                  | Velocidade do motor (rpm) | 1500  |

Fonte: Dados obtidos em (Chabani, et al., 2017)

### 3.2.3. Vantagens do back-to-back

O conversor *Back-to-Back* permite:

- Controlar a potência ativa e reativa no rotor;
- Manter a tensão do link-CC constante;
- Controlar o fluxo de potência entre o gerador e a rede;
- Permite operação nas velocidades subsíncrona e super-síncrona;

### 3.2.4. Desvantagens do back-to-back

- Necessita de uma estratégia de controle mais complexa para cada conversor;
- Maior custo comparado às demais topologias avaliadas neste trabalho.
- Elevada tensão no *link-CC* (1200V) que implica no uso de capacitores e semicondutores de alto custo.

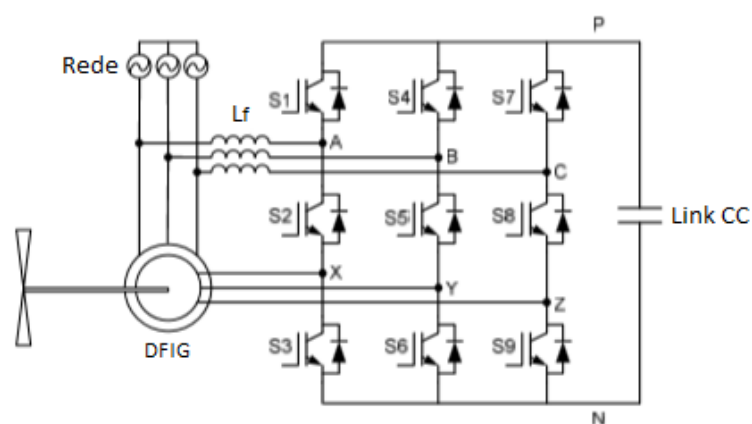
## 3.3. CONVERSOR 9 CHAVES

### 3.3.1. Princípios básicos

Em comparação com o conversor de dois estágios, *back-to-back*, este possui um estágio com três braços para operação de conversor CA/CA bidirecional.

Como ilustrado na Figura 3.9, as chaves S1, S4 e S7 são equivalentes ao conversor do lado da rede (GSC) da topologia *back-to-back*, e as chaves S3, S6 e S9 equivalem ao conversor do lado da máquina (RSC). As chaves S2, S5 e S8 são comuns às chaves superiores e inferiores. A operação do conversor é classificada em dois modos: operação de frequência constante e operação de frequência variável.

Figura 3.9 Conversor de 9 chaves



Fonte: Adaptado de (Soe, et al., 2011)

As restrições de comutação propostas, são mostradas na Tabela 3.3, em que dois níveis de tensão de saída são determinados pelos padrões de comutação das chaves superior,

central e inferior de cada braço. Para uma comutação adequada, pelo menos uma das três chaves em cada braço deve ser desligada.

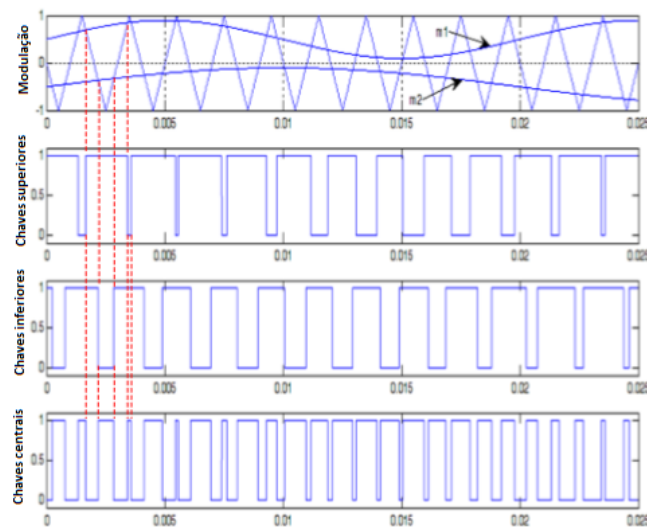
Tabela 3.3 Comutação padrão do conversor de 9 chaves

| Condições | S1 | S2 | S3 | $V_{AN}$ | $V_{XN}$ |
|-----------|----|----|----|----------|----------|
| 1         | 1  | 1  | 0  | $V_{dc}$ | $V_{dc}$ |
| 2         | 1  | 0  | 1  | $V_{dc}$ | 0        |
| 3         | 0  | 1  | 1  | 0        | 0        |

Fonte: Adaptado de (Soe, et al., 2011)

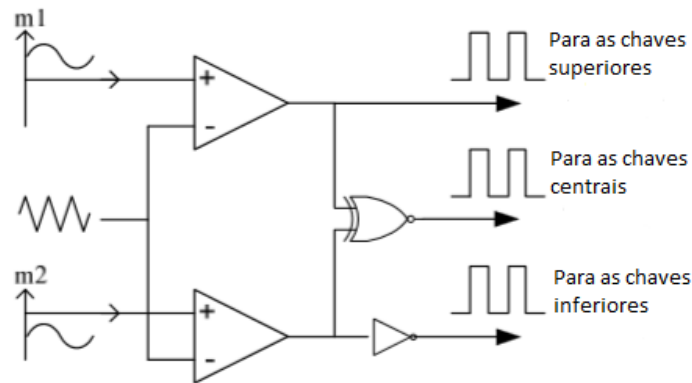
A modulação PWM, Figura 3.10, pode ser utilizada para gerar as formas de onda de comutação. As tensões senoidais de referência superior e inferior são comparadas com ondas triangulares para gerar sinais PWM, como é ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.10 Modulação senoidal PWM para o conversor de 9 chaves



Fonte: Adaptado de (Soe, et al., 2011)

Figura 3.11 Geração de sinais de gate utilizando portas lógicas



Fonte: Adaptado de (Soe, et al., 2011)

Como a topologia utilizando o DFIG envolve velocidade variável, nos nós A, B e C, ou seja, lado da rede, a frequência será constante e nos nós X, Y e Z, lado da máquina, a frequência será variável proporcional ao escorregamento da máquina. Como há referências de sinais com frequências diferentes, a operação de frequência variável é considerada.

Os sinais de modulação  $m1$  e  $m2$  possuem *offset* CC de 0,5 e -0,5 respectivamente, e como ilustra a Figura 3.11, os sinais de *gate* das chaves centrais são realizados pela porta lógica XNOR dos sinais superiores e inferiores. Após comparador, o índice de modulação modificado é calculado como:

$$m = \frac{V_{ref}}{V_{dc}/2} \pm \frac{1}{2} \quad (3.1)$$

Sendo que  $V_{ref}$  é a tensão de referência do sinal e  $V_{dc}$  é a tensão do link CC.

Para o controle do lado da rede, as chaves S1, S2, S4, S5, S7 e S8 do conversor são utilizadas para a regulação da tensão no link CC através do capacitor, utilizando o controle vetorial para controlar as tensões  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ .

Para o controlador do lado da rede, as variáveis do eixo síncrono, são transformadas em sinais de modulação trifásica para o lado superior do conversor. Os sinais de modulação são limitados pelas funções de comutação para o modo de frequência variável do conversor. Um sinal de offset DC de +0,5 V é adicionado aos sinais de modulação comparado ao

conversor *back-to-back*. Com o controle dos comutadores superiores do conversor, é possível obter a regulação do link CC e o controle do fator de potência.

Para o controlador do lado da máquina, os comutadores inferiores S3, S6 e S9 e centrais, S2, S5 e S8 são utilizados para operar como inversor fonte de tensão bidirecional com frequência variável proporcional ao escorregamento.

O índice de modulação  $m_2$  é compensado por um valor CC de -0,5 devido à exigência de chaveamento para a operação em frequência variável.

Quando o estator do DFIG está conectado à rede elétrica, não deve existir diferença de tensão entre o estator e a rede. Durante a partida, o terminal do estator está aberto e, portanto, não há troca de energia ativa entre o gerador e a rede. Depois que o gerador é sincronizado com a rede, o algoritmo de controle é iniciado para controlar a potência ativa e reativa.

### 3.3.2. Trabalho relacionado ao conversor de 9 chaves

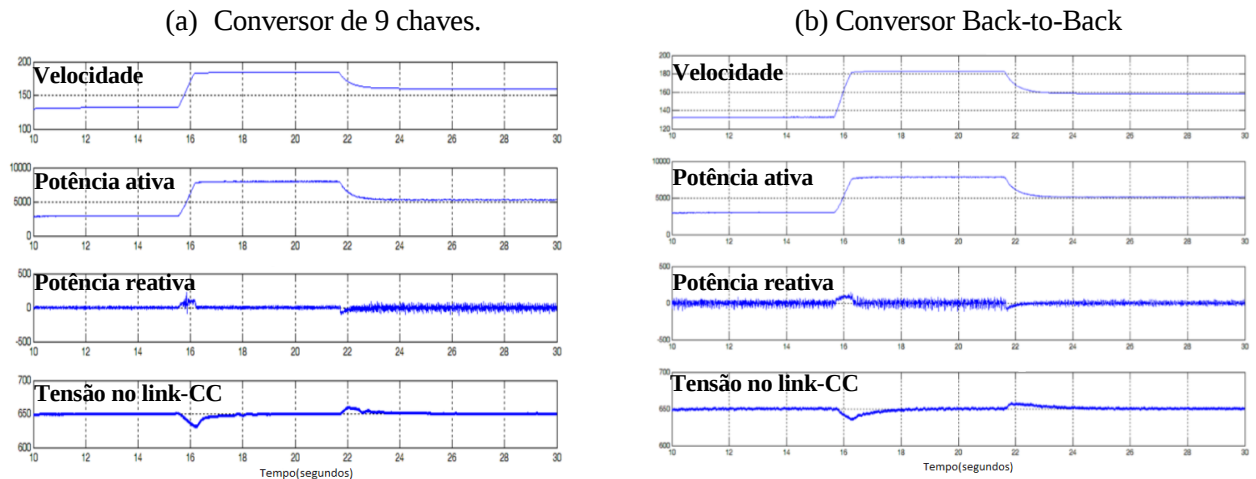
Em (Soe, et al., 2011), é proposto uma topologia para o gerador de indução duplamente alimentado utilizando um conversor de 9 chaves em substituição ao conversor *back-to-back* composto por 12 chaves. Esta topologia é muito utilizada em veículos elétricos híbridos e em fontes de geração ininterruptas. A redução do número de chaves é vantajosa em termos de custo e perdas de comutação de energia. As simulações deste artigo comparam os desempenhos da topologia utilizando o conversor de 9 chaves com a topologia utilizando o conversor *back-to-back*. Para análise e comparação do comportamento do DFIG utilizando o conversor de chaves e o conversor *back-to-back*, foram realizadas simulações no *Matlab/Simulink*.

No instante  $t = 15,8$  segundos, aumentou a velocidade do vento de 3,1 m/s para 5 m/s. como mostra a Figura 3.12(a), a velocidade do gerador aumentou para 188 rad/s, e como a potência ativa é diretamente proporcional a velocidade do rotor, a potência ativa aumentou para 8 kW enquanto a potência reativa se manteve próxima de zero para fator de potência unitário. Durante o estado transitório a potência reativa tende a aumentar, mas é regulada para o ponto de ajuste zero no estado estacionário; a tensão do link-CC também sofre flutuação no

estado transitório porem é regulada para 650 V. Após, a velocidade do vento tem uma redução chegando a 4 m/s, concomitantemente, a potência ativa também sofre uma redução.

Como ilustrado na Figura 3.12(b), as respostas do conversor *back-to-back* foram similares as do conversor de 9 chaves, portanto, satisfatórias.

Figura 3.12 Resultados da simulação apresentados em (Soe, et al., 2011)



Fonte: Adaptado de (Soe, et al., 2011)

Com a simulação, a resposta do conversor back-to-back à variação de velocidade foi similar ao conversor de 9 chaves, sendo satisfatória.

A topologia proposta também foi implementada em (Soe, et al., 2011), Figura 3.13, utilizando um motor de indução de velocidade variável como máquina primária conectada a uma máquina de indução de rotor bobinado de 7,5 kW (415 V, 50 Hz, 4 polos) atuando como DFIG. Para o desenvolvimento do controle em tempo real foi utilizado um controlador dSPACE DS1103 e a frequência de comutação escolhida para o sinal PWM de 5 kHz.

Figura 3.13 Implementação do conversor de 9 chaves



Fonte: (Soe, et al., 2011)

Com as simulações, é possível notar que mesmo com a redução de 25% do número de chaves, o desempenho foi o mesmo que o conversor *back-to-back* (12 chaves). Constatou-se também que o controle independente de potência ativa e reativa no lado do estator pode ser alcançado com a regulação da tensão no link CC.

### 3.3.3. Vantagens do Conversor 9 Chaves

- Manter a tensão do link-CC constante;
- Controlar o fluxo de potência entre o gerador e a rede;
- Permite operação nas velocidades subsíncrona e super-síncrona;
- Necessita de 25% menos comutadores comparado ao *back-to-back*;
- Com a redução do número de comutadores, o custo é reduzido e há uma redução das perdas de comutação;

### 3.3.4. Desvantagens do Conversor 9 Chaves

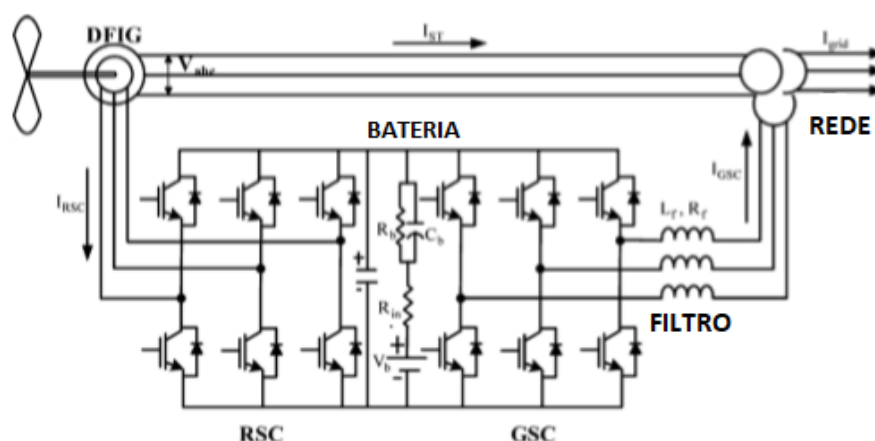
- Necessita de uma comutação adequada para obter a regulação do link CC e o controle do fator de potência;
- Conversor menos comum no mercado.

### 3.4. CONVERSOR BACK-TO-BACK COM BANCO DE BATERIA

### 3.4.1. Princípios de funcionamento

Este conversor consiste exatamente no mesmo *back-to-back* apresentado com a diferença da presença de um banco de baterias para o nivelamento de carga, conforme mostra a Figura 3.14. O banco de baterias é calculado tomando como base a potência média extraída da turbina que também depende da velocidade do vento disponível no local. Como o desejável dos conversores é operar no ponto de máxima potência, então para o nivelamento de carga, se a potência extraída é maior que a demanda da carga então a energia restante deve ser armazenada na bateria. E se a potência gerada é menor, a bateria deve suprir com a potência restante.

Figura 3.14 Conversor back-to-back com banco de bateria



Fonte: Adaptado de ( Ganti, et al., 2012)

No controle do conversor GSC (conversor do lado da rede), cujo objetivo é basicamente balancear as cargas e eliminar harmônicos, a potência da rede é controlada para ser um valor de referência fixa e determinada a partir dos dados da velocidade do vento. O GSC é controlado pela malha de referência da tensão no estator, a potência ativa e a potência reativa são controladas pelas componentes das correntes de eixo direto e de quadratura, respectivamente. Este valor é comparado com o valor de potência atual da rede, o erro é processado por um controlador PI para gerar o componente do eixo  $q$  da corrente de referência da rede. Para o controle da malha externa de potência reativa do GSC, a variável controlada é

a potência reativa do estator, e o controle da potência ativa abrange a regulação de potência da rede para obter um equilíbrio da potência da rede. A componente do eixo  $d$  da corrente de referência da rede é escolhida de acordo com a potência reativa compartilhada entre o estator e o GSC, podendo ser zero para operar com fator de potência unitário. Estas correntes de referência, são comparadas com as correntes da rede e o erro é processado por um controlador PI para gerar o controle de tensão para o gerador de sinal PWM no lado da rede.

No conversor RSC (conversor do lado do rotor), a malha externa de potência ativa e reativa são projetados para extrair a máxima potência do vento utilizando um algoritmo de MPPT. O ponto de ajuste da potência ativa pode ser obtido a partir do valor instantâneo da velocidade do rotor, e a corrente do rotor é controlada tomando como referência o fluxo do estator para obter a potência ativa desejada de acordo com as características de velocidade. A tensão no estator é controlada pela regulação da corrente do rotor de eixo direto. Para alcançar o ponto de máxima potência, a velocidade da máquina é controlada pela corrente do rotor do eixo de quadratura.

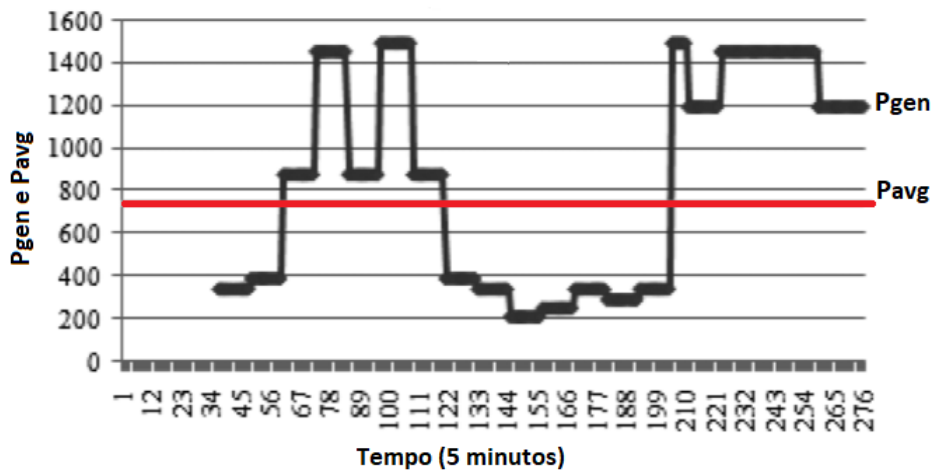
O ponto de ajuste da potência reativa pode ser calculado a partir do ponto de ajuste da potência ativa e do fator de potência desejado. No referencial orientado do fluxo do estator, a corrente do rotor do eixo  $d$  é usada para controlar a potência reativa de referência.

### 3.4.2. Trabalho relacionado

Em ( Ganti, et al., 2012), foi feita uma estratégia de controle do DFIG, com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), utilizando um banco de bateria para armazenamento de energia, reduzindo flutuações de energia devido às variações de velocidade do vento. Quando a velocidade do vento estiver alta (máquina operando na velocidade supersíncrona), a potência de saída dos conversores é maior comparada com a potência média calculada, portanto armazena-se esta potência extra ao banco de baterias. Entretanto, quando a velocidade do vento é baixa (máquina operando na velocidade subsíncrona), é retirada energia armazenada no banco de bateria para manter a potência média fornecida à rede.

Os dados de vento utilizados por ( Ganti, et al., 2012) foram extraídos da cidade de Bapatla no estado de Andhra Pradesh (Índia), em 11 de novembro de 2009. A Figura 3.15 mostra a potência gerada ( $P_{gen}$ ) sob diferentes velocidades do vento e a potência média ( $P_{avg}$ ), calculada a partir da potência gerada, do dia em que foi feita a medição da velocidade do vento.

Figura 3.15 Potência gerada e a potência média em ( Ganti, et al., 2012)

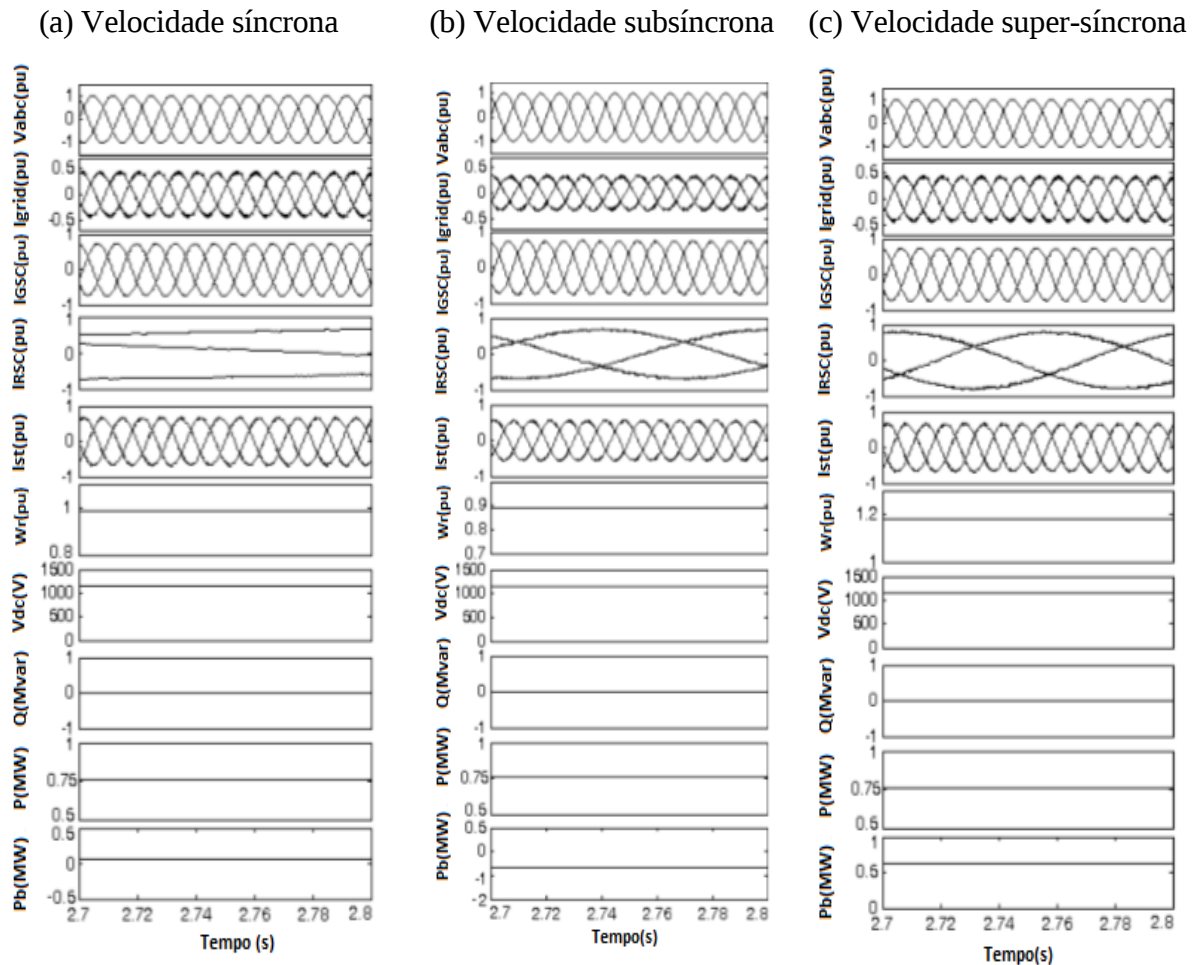


Fonte: Adaptado de ( Ganti, et al., 2012)

Na Figura 3.16, é possível analisar as formas de onda da tensão no estator ( $V_{abc}$ ), corrente na rede ( $I_{grid}$ ), corrente no GSC ( $I_{GSC}$ ), corrente no RSC ( $I_{RSC}$ ), corrente no estator ( $I_{st}$ ), velocidade do rotor ( $W_R$ ), tensão no link-CC ( $V_{dc}$ ), potência reativa ( $Q$ ), potência da rede ( $P$ ) e potência da bateria ( $P_b$ ).

Na Figura 3.16 (a) a máquina opera na velocidade síncrona, ou seja: velocidade do vento = 10 m/s e velocidade do rotor = 1 pu. Na Figura 3.16(b), a máquina opera na velocidade subsíncrona: velocidade do vento = 8 m/s e velocidade do rotor = 0,9 pu. E na Figura 3.16(c), a máquina opera na velocidade super-síncrona: velocidade do vento = 12 m/s e velocidade do rotor = 1,2 p.u.

Figura 3.16 Resultados de simulação em ( Ganti, et al., 2012)



Fonte: Adaptado de ( Ganti, et al., 2012)

Se a potência da bateria é negativa, então a bateria será descarregada para qualquer potência da rede. E se é positiva, então a potência será armazenada na bateria. A potência da rede foi mantida no valor de 0,75 MW, a potência reativa foi mantida no valor zero, demonstrando fator de potência unitário.

Com os resultados obtidos pelas simulações de ( Ganti, et al., 2012), pode-se concluir que, embora houve variação da velocidade do vento, a potência fornecida à rede permaneceu constante. Assim, a estratégia de controle foi eficaz para manter o fluxo de potência na rede constante. A estratégia utilizando o banco de baterias se mostrou vantajosa, pois a concessionária mantendo a potência da rede constante durante os períodos de geração excedente, os consumidores não pagarão por essa potência excedida.

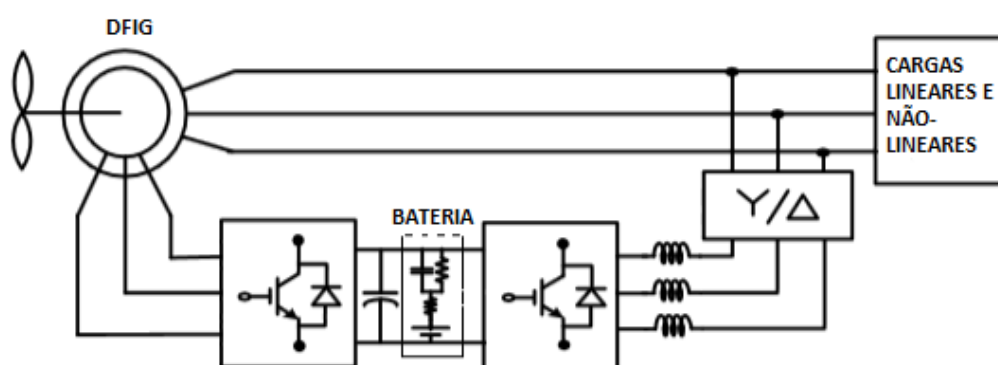
Tabela 3.4 Parâmetros do experimento de ( Ganti, et al., 2012)

|                | Parâmetro                         | Valor |
|----------------|-----------------------------------|-------|
| <b>Turbina</b> | Potência (kW)                     | 1500  |
|                | Velocidade nominal do vento (m/s) | 14    |
|                | Número de pás                     | 3     |
|                | Diâmetro do rotor (m)             | 82    |
| <b>Gerador</b> | Potência nominal (MW)             | 1,5   |
|                | Tensão no estator (V)             | 575   |
|                | Frequência (Hz)                   | 50    |
|                | Número de polos                   | 4     |
| <b>Bateria</b> | Tensão nominal da bateria (V)     | 1200  |

Fonte: Dados obtidos em ( Ganti, et al., 2012)

Em ( Swami Naidu & Singh, 2014), apresenta-se uma estratégia de controle do DFIG utilizando o conversor *back-to-back*, com banco de baterias utilizando o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) sob variação da velocidade do vento. Um modelo de referência de sistema adaptativo (MRAS) é utilizado para eliminar o sensor de posição do rotor. Um protótipo desta estratégia de controle foi implementado utilizando um DSP dSPACE DS1103, com um DFIG de 3,7 kW, de 12 A no estator e 18 A no rotor. O protótipo foi desenvolvido para testar o DFIG para compensação de cargas não-lineares sob condições estacionárias e dinâmicas, modo subsíncrono e modo super-síncrono. A Figura 3.17 ilustra o modelo proposto descrito anteriormente.

Figura 3.17 Configuração proposta em ( Swami Naidu &amp; Singh, 2014)

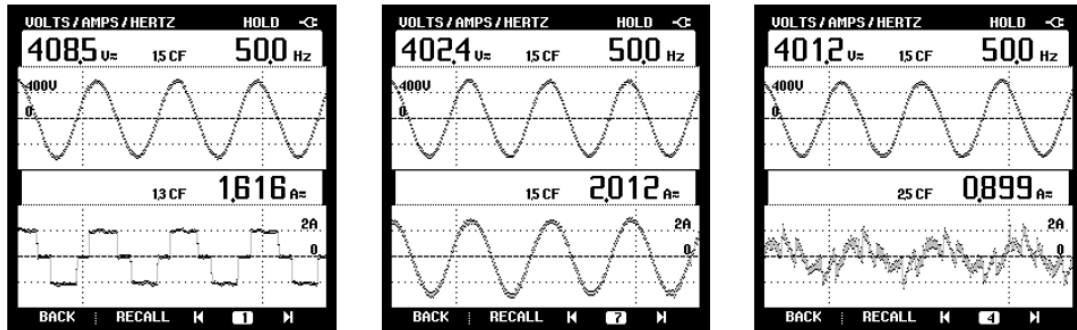


Fonte: Adaptado de ( Swami Naidu & Singh, 2014)

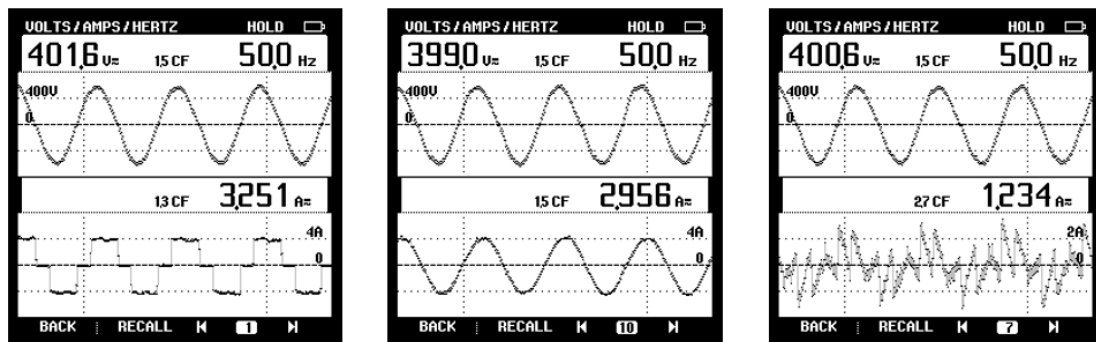
Como ilustra a Figura 3.18, a tensão de linha no estator e corrente de carga na fase A, tensão de linha no estator e corrente do estator na fase A, tensão de linha no estator e corrente no transformador do lado do estator, na fase A. Os resultados mostram que ainda que a carga seja não-linear, a corrente no estator é senoidal devido a compensação de harmônicos do GSC.

Figura 3.18 Resultados experimentais em ( Swami Naidu &amp; Singh, 2014).

(a) Velocidade subsíncrona



(b) Velocidade super-síncrona

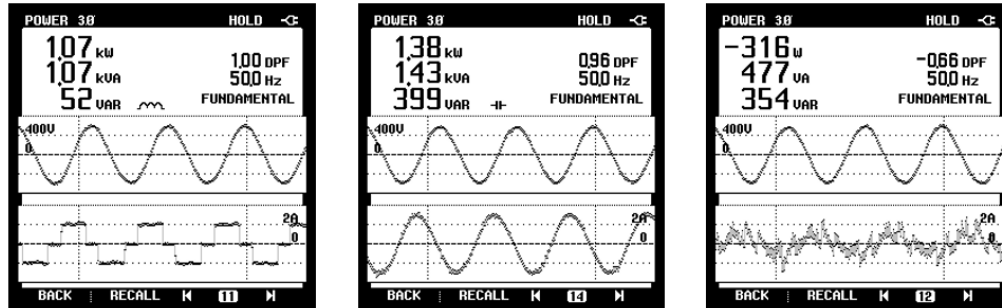


Fonte: ( Swami Naidu &amp; Singh, 2014)

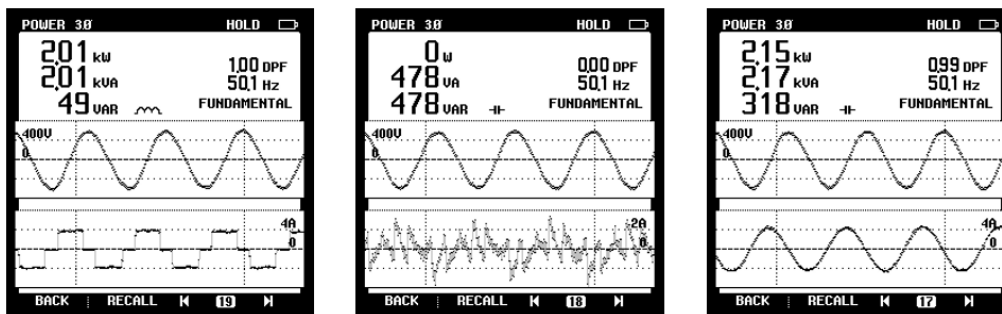
Como ilustra a Figura 3.19 (a), como a potência da carga é menor que a potência gerada, a energia restante é armazenada na bateria através do GSC.

Figura 3.19 Potência da carga e corrente de carga na fase A, Potência no estator e corrente de carga na fase A, e Potência no GSC e corrente no transformador do lado do estator, na fase A.

(a) Velocidade subsíncrona



(b) Velocidade super-síncrona



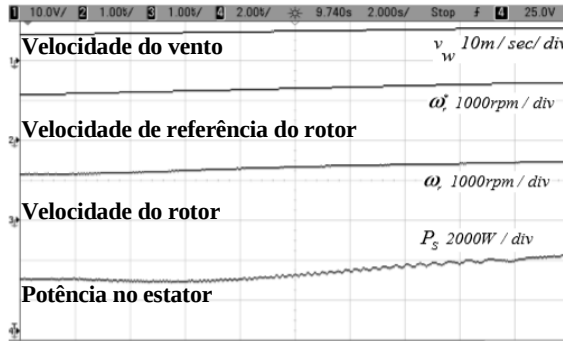
Fonte: ( Swami Naidu & Singh, 2014)

Como mostra a Figura 3.20 (a), com o aumento na velocidade do vento, a velocidade de referência da velocidade do rotor também sofre uma variação a fim de conseguir operar no ponto de máxima potência (MPPT) utilizando o controle da relação de velocidade na extremidade das pás (*tip speed ratio*). A velocidade atual do rotor também sofre variação em razão da velocidade do controlador PI. E como a velocidade e a potência são aumentadas, a potência no estator também aumenta.

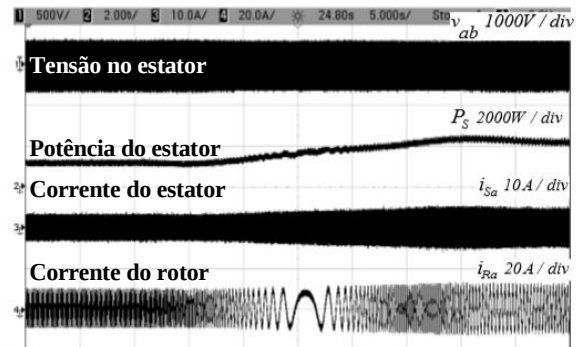
Assim como ilustra a Figura 3.20 (b), a tensão no estator é mantida constante mesmo com o aumento da velocidade do vento. A corrente no estator e no rotor também aumentam devido ao aumento na velocidade do vento. As correntes do rotor alteram sua sequência de fases devido à mudança no modo de operação da velocidade do rotor, do modo subsíncrono ao modo super-síncrono.

Figura 3.20 Resultado de simulação em ( Swami Naidu & Singh, 2014) sob aumento na velocidade do vento (a) e (b), e redução na velocidade do vento (c) e (d).

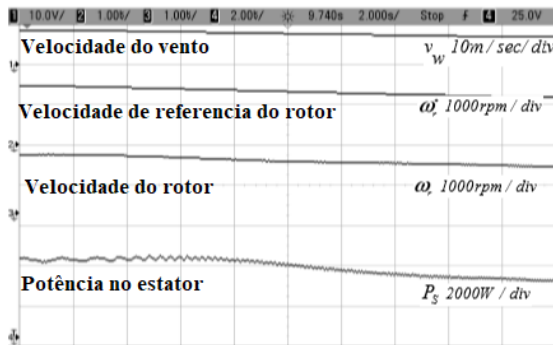
(a) Aumento na velocidade do vento



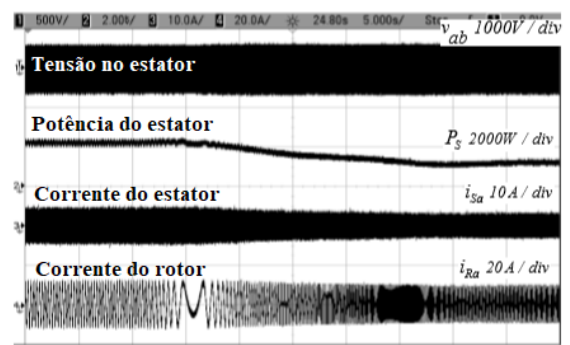
(b) Aumento na velocidade do vento



(c) Redução na velocidade do vento



(d) Redução na velocidade do vento



Fonte: ( Swami Naidu & Singh, 2014)

As simulações propostas demonstraram que a estratégia de controle proposta operou favoravelmente, conseguindo alcançar o ponto de máxima potência mesmo com a variação de velocidade do vento. A compensação harmônica, o nivelamento de potência e o balanceamento de carga foram alcançados através do controle do GSC. O desempenho do controlador de tensão e frequência foi testado usando o processador dSPACE DS1103, para mudanças dinâmicas na velocidade do vento e sob mudança repentina de cargas.

### 3.4.3. Vantagens do back-to-back com banco de bateria

- Controlar a potência ativa e reativa no rotor;
- Manter a tensão do link-CC constante;
- Controlar o fluxo de potência entre o gerador e a rede;

- Permite operação nas velocidades subsíncrona e super-síncrona;
- Redução de flutuações de energia devido às variações de velocidade do vento.
- Diminuição da capacitância necessária no link CC devido à presença do banco de baterias.

#### 3.4.4. Desvantagens do back-to-back com banco de bateria

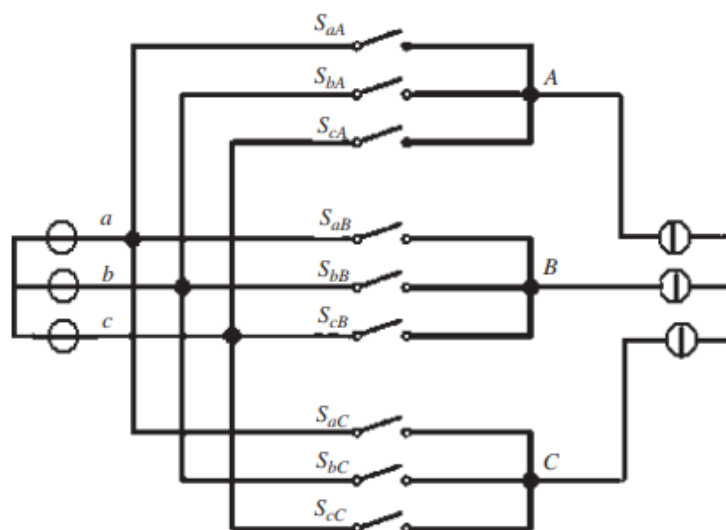
- Devido à utilização do conversor *back-to-back*, necessita de uma estratégia de controle mais complexa para cada conversor;
- Maior custo comparado às demais topologias avaliadas neste trabalho.
- Elevada tensão no link CC que implica em maiores esforços de tensão nos componentes.
- Devido à presença do banco de bateria, o custo é maior e necessita de manutenção constante.

### 3.5. CONVERSOR MATRICIAL

#### 3.5.1. Princípios do conversor matricial

O conversor matricial consiste em 9 comutadores bidirecionais, sendo que, cada fase de saída está associada a um conjunto de três comutadores conectados a três fases de entrada. Esse conversor permite a conexão de qualquer fase de entrada para qualquer fase de saída em qualquer instante.

Figura 3.21 Conversor matricial



Fonte: (Ghedamsi, et al., 2008)

---

A comutação das chaves é definida como:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & S_{ij} \text{ é fechado,} \\ 0 & S_{ij} \text{ é aberto,} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$i \in \{a, b, c\}, j \in \{A, B, C\}$$

Sendo T, a matriz dos comutadores:

$$T = \begin{bmatrix} SaA & SbA & ScA \\ SaB & SbB & ScB \\ SaC & SbC & ScC \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Então a tensão de saída  $V_{out}$  e corrente de entrada  $I_{in}$  são definidos como:

$$V_{out} = T \times V_{in} \quad (3.4)$$

$$I_{in} = T^T \times I_{out} \quad (3.5)$$

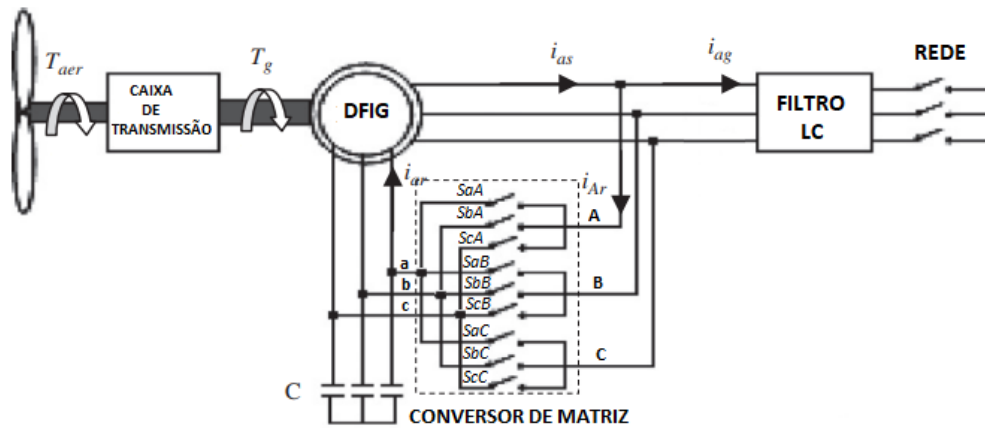
O conversor matricial possui a vantagem de ser um circuito simples que necessita de um circuito de potência compacto com controle de frequência e possui fluxo de potência bidirecional.

### 3.5.2. Trabalho relacionado ao conversor matricial

Em (Aouzellag, et al., 2006), um esquema de geração de energia eólica conectada à rede usando um gerador de indução duplamente alimentado com um conversor direto em matriz CA-CA é proposto. A estratégia propõe um algoritmo de controle de vetor de fluxo do estator e um conversor de matriz modulada de vetor espacial para controlar a corrente do rotor. O esquema permite o rastreamento do ponto de máxima potência para máxima captura de energia a partir do vento e regulação da potência ativa e reativa usada no regulador.

A topologia do conversor matricial de três fases-três fases consiste em um conversor com nove chaves bidirecionais e cada fase de saída é associada a três conjuntos de chaves conectadas a três fases de entrada. Essa configuração de comutação bidirecional permite a conexão de qualquer fase na entrada ou na saída a qualquer instante. O conversor de matriz é alimentado pela fonte de tensão, portanto as fases de entrada não devem estar em curto e devido à natureza indutiva da carga, as fases de saída não devem estar abertas.

Figura 3.22 Estratégia proposta por (Aouzellag, et al., 2006) utilizando o conversor matricial



Fonte: Adaptado de (Aouzellag, et al., 2006)

Uma estratégia de modulação foi necessária a fim de sintetizar as tensões através do circuito do rotor das tensões da rede e as correntes de entrada das correntes do rotor. O conversor é representado por uma matriz 3x3 porque os nove comutadores bidirecionais podem se conectar uma fase de entrada a uma fase de saída sem qualquer elemento de armazenamento de energia. Sendo  $T$  a matriz dos comutadores, tem-se:

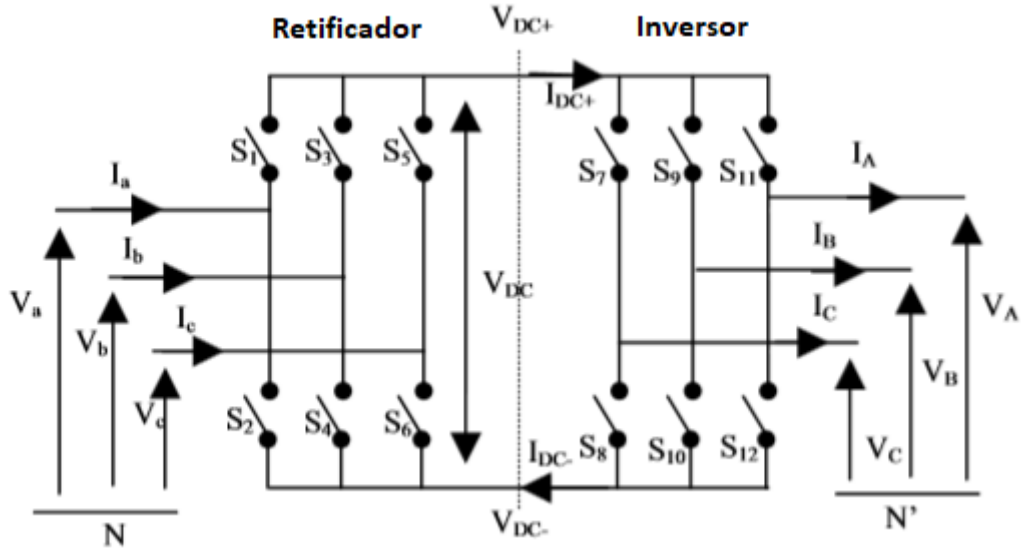
$$T = \begin{bmatrix} SaA & SbA & ScA \\ SaB & SbB & ScB \\ SaC & SbC & ScC \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$V_{out} = T \times V_{in} \quad (3.7)$$

$$I_{in} = T^T \times I_{out} \quad (3.8)$$

Utilizou-se a modulação indireta a fim de dissociar o controle das correntes da rede e as tensões de saída através do circuito de rotor. Um circuito equivalente da modulação indireta do conversor matricial é apresentado na Figura 3.23.

Figura 3.23 Modulação indireta do conversor matricial



Fonte: Adaptado de (Aouzellag, et al., 2006)

Assim, pode-se considerar o conversor matricial como um conversor PWM *back-to-back* e isso significa dizer que as estratégias PWM para inversor ou retificador podem ser aplicadas ao conversor matricial.

São descritas duas modulações independentes de vetor espacial para os estágios do retificador da fonte de corrente e do inversor da fonte de tensão, em seguida, é feita uma combinação dos dois resultados de modulação para o conversor matricial.

A função de modulação do conversor matricial é apresentada na Equação 3.9.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \left( d_\gamma d_\alpha \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + d_\gamma d_\alpha \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Para a conexão do DFIG à rede, são necessárias três etapas: regulação das tensões do estator com as tensões da rede como referência, conexão do estator à rede e regulação da potência entre o estator e a rede. Após devida transformação das variáveis para a referência síncrona ( $dq$ ), as potências ativas e reativa do estator são definidas por:

$$P = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \quad (3.10)$$

---


$$Q = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr} \quad (3.11)$$

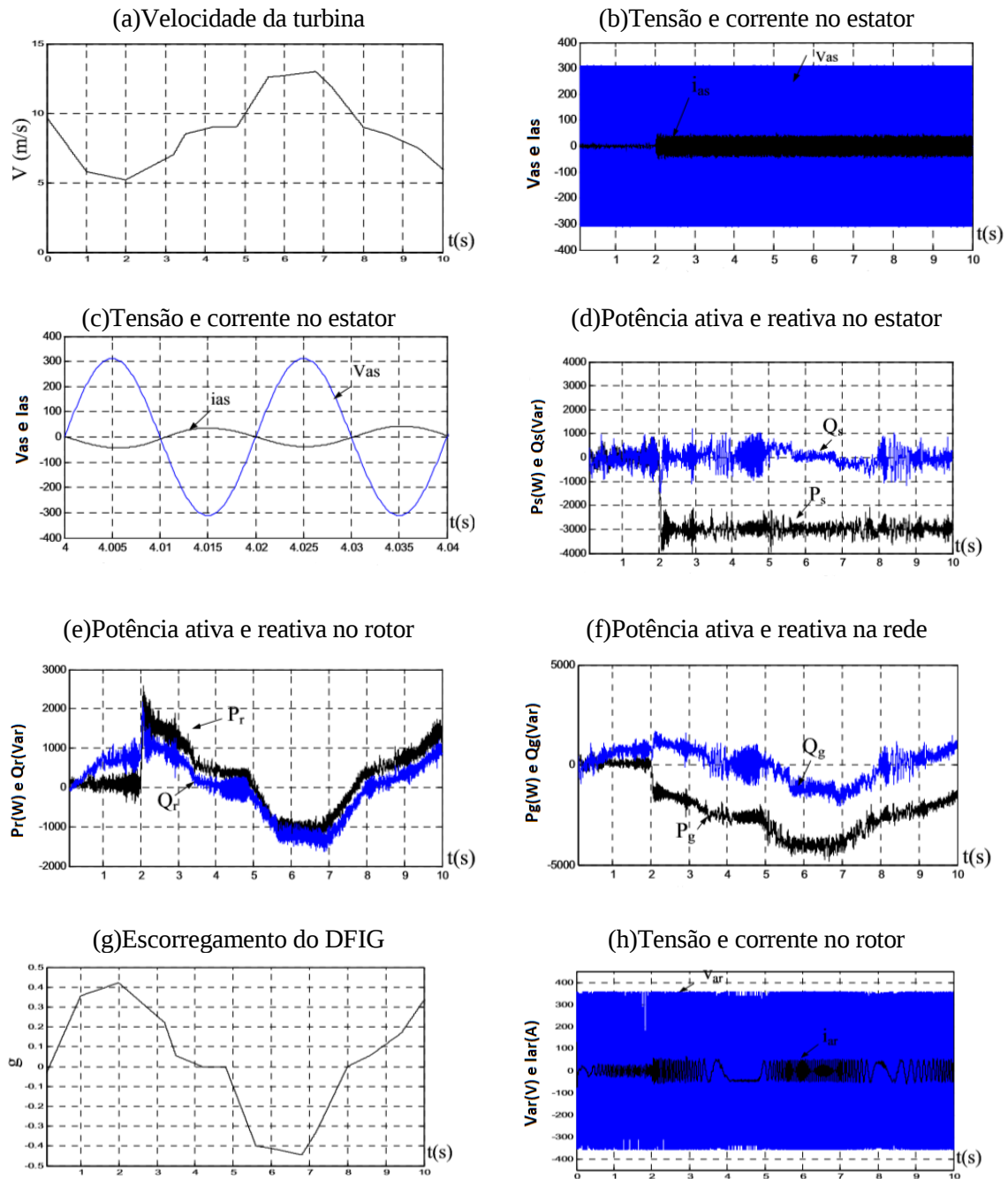
Foram realizadas simulações da estratégia proposta com potência reativa de referência igual a zero para fator de potência unitário e com potência ativa  $P_{sref} = -3000 \text{ W}$  no instante  $t = 2 \text{ s}$ . Para controlar a potência trocada entre o estator e a rede, foi utilizado o controle vetorial com fluxo direto no estator.

Os resultados da simulação estão apresentados na Figura 3.24. Pode-se analisar na Figura 3.24(b) que antes da aplicação de um nível de potência ativa, a corrente do estator é nula, enquanto a tensão é igual à da rede. Ao aplicar um nível de potência ativa em  $t = 2 \text{ s}$ , aparece uma corrente senoidal, em fase oposta com a tensão, pode-se analisar na Figura 3.24(c). Na Figura 3.24(d) máquina fornece potência ativa do estator à rede, logo, a corrente e tensão no estator não dependem das variações do vento, dependem apenas das potências ativa e reativa de referência (rede).

Como observado na Figura 3.24(e), a potência ativa no rotor varia de acordo com a velocidade do vento. Para um escorregamento positivo, a máquina absorve potência ativa do rotor (subsíncrono), para um escorregamento negativo, a máquina fornece potência ativa do rotor à rede (super-síncrono). E para o escorregamento igual a zero, a potência ativa do rotor permanece constante correspondendo às perdas joule do rotor e a potência reativa é nula para fator de potência unitário. E pela Figura 3.24 (f), a potência da rede varia de acordo com a variação da velocidade do vento.

A Figura 3.24 (g) mostra o escorregamento do gerador e a Figura 3.24 (h) ilustra a corrente e tensão no rotor.

Figura 3.24 Resultado das simulações em (Aouzellag, et al., 2006).



Fonte: Adaptado de (Aouzellag, et al., 2006)

O conversor matricial apresenta resultados favoráveis mesmo consistindo de um menor número de comutadores em relação ao conversor *back-to-back*. Porém, torna-se desvantajoso seu uso devido às comutações não-ideais das chaves podendo ocasionar picos de tensão ou surtos de corrente.

Figura 3.25 Parâmetros do experimento de (Aouzellag, et al., 2006)

|                | Parâmetro                | Valor |
|----------------|--------------------------|-------|
| <b>Turbina</b> | Diâmetro (m)             | 60    |
|                | Número de pás            | 3     |
| <b>Gerador</b> | Potência (MW)            | 1.5   |
|                | Tensão (V)               | 690   |
|                | Frequência (Hz)          | 50    |
|                | Número de pares de polos | 2     |

Fonte: Dados obtidos em (Aouzellag, et al., 2006)

### 3.5.3. Vantagens do conversor matricial

- Mantem a tensão do link-CC constante;
- Controlar o fluxo de potência entre o gerador e a rede;
- Permite operação nas velocidades subsíncrona e super-síncrona;
- Necessita de 9 comutadores;

### 3.5.4. Desvantagens do conversor matricial

- Necessita de uma modulação adequada dos comutadores, pois as comutações não-ideais das chaves podem ocasionar picos de tensão ou surtos de corrente;
- Não há controle da potência ativa e reativa no rotor;

## 3.6. RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA

Com base nos artigos revisados, foram feitas comparações para permitir concluir sobre as características predominantes de cada topologia de conversores e em quais aplicações são mais indicadas. Na Tabela 3.5 estão organizadas estas características para facilitar a comparação.

A topologia mais utilizada para o aproveitamento de energia do gerador de indução duplamente alimentado aplicado a geração eólica, consiste na utilização do conversor *back-to-back* com estratégia de controle PI para o conversor do lado da rede (GSC) e para o conversor do lado do gerador (RSC), e essa estratégia é vista em (Kharchouf, et al., 2017), (Chabani, et al., 2017), ( Ganti, et al., 2012) e ( Swami Naidu & Singh, 2014).

(Kharchouf, et al., 2017) realiza simulações a fim de analisar o desempenho dos conversores RSC e GSC para as condições de velocidade subsíncrona e super-síncrona do gerador com variação da velocidade do vento. Após as simulações, o controle dos conversores obteve resultado satisfatório pois a tensão no link-CC foi mantida constante e o MPPT funcionou corretamente.

(Chabani, et al., 2017) realizou a implementação da topologia mais utilizada, conversor *back-to-back*, utilizando um dSPACE DS1104 utilizando um gerador de 3 kW e um motor CC de 3 kW como turbina do sistema sob variação da velocidade do vento e variação de cargas. Porém, a proposta de (Chabani, et al., 2017) apresentou uma estratégia de controle diferente, controlando apenas o conversor do lado do gerador e utilizando o controle com histerese. As simulações foram realizadas com três condições de operação: variação da tensão do estator, de carga e da velocidade do rotor. E para todas as condições, o controle por PI-histerese apresentou resultados satisfatórios.

(Soe, et al., 2011) apresenta uma topologia utilizando um conversor de 9 chaves em substituição ao conversor de 12 chaves (*back-to-back*). Foram realizadas simulações comparando o conversor *back-to-back* ao conversor proposto a fim de analisar o desempenho dos controladores para manter a tensão do link-CC constante e controlar as potências reativa e ativa. Após, implementou-se a topologia proposta por (Soe, et al., 2011) utilizando um motor de indução de 7,5 kW como DFIG e um controlador dSPACE DS 1103. Com as simulações e a implementação da topologia proposta, foi possível notar que mesmo com a redução do número de comutadores o desempenho do conversor de 9 chaves foi o mesmo que o conversor *back-to-back*.

(Ganti, et al., 2012) apresenta uma topologia utilizando o conversor *back-to-back* e um banco de bateria para reduzir as flutuações de energia devido as variações de velocidade do vento. São realizadas simulações variando a velocidade do rotor e do vento fazendo a máquina operar nas velocidades síncrona, subsíncrona e super-síncrona. A partir dos resultados, concluiu-se que o uso do banco de bateria foi eficiente nos três modos de velocidade da máquina mantendo o fluxo de potência na rede constante.

(Swami Naidu & Singh, 2014) implementa a mesma topologia proposta por (Ganti, et al., 2012), com conversor *back-to-back* e o banco de bateria, com variação de cargas lineares e não-lineares e variação da velocidade do vento. Com as simulações, pode-se concluir que o

---

controle obteve desempenho favorável pois houve a compensação harmônica, nivelamento de potência e balanceamento de carga mesmo com as variações de vento e cargas.

(Aouzellag, et al., 2006), propõe a utilização de um conversor direto em matriz em substituição ao conversor *back-to-back*. Foram realizadas simulações com potência reativa de referência nula e aplicando um degrau negativo à potência ativa de referência. Os resultados a partir das simulações foram favoráveis demonstrando que mesmo com menor número de comutadores, obteve o mesmo desempenho do conversor usual.

Tabela 3.5 Comparação das topologias descritas no trabalho

|                                         | <b>Back-to-back</b>                                                        | <b>9 chaves</b>                                                                                          | <b>Back-to-back com<br/>bateria</b>                                                         | <b>Conversor<br/>matricial</b>                                                             |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Referências</b>                      | (Kharchouf, et al., 2017) e<br>(Chabani, et al., 2017)                     | (Soe, et al., 2011)                                                                                      | ( Ganti, et al., 2012)<br>e<br>( Swami Naidu & Singh, 2014)                                 | (Aouzellag, et al., 2006)                                                                  |
| <b>Velocidade do vento (m/s)</b>        | 7 - 13                                                                     | 3,1 - 5                                                                                                  | 8 - 12                                                                                      | -                                                                                          |
| <b>Número de pás</b>                    | 3                                                                          | -                                                                                                        | 3                                                                                           | 3                                                                                          |
| <b>Tensão do link-CC (V)</b>            | 1200                                                                       | 650                                                                                                      | 1200                                                                                        | -                                                                                          |
| <b>Potência nominal do gerador (kW)</b> | 1500(simulação) e 3 (experimental)                                         | 7,5 (experimental)                                                                                       | 1500(simulação) e 3,7(experimental)                                                         | 1500 (simulação)                                                                           |
| <b>Número de comutadores</b>            | 12                                                                         | 9                                                                                                        | 12                                                                                          | 9                                                                                          |
| <b>MPPT</b>                             | Sim                                                                        | -                                                                                                        | Sim                                                                                         | Sim                                                                                        |
| <b>Custo</b>                            | Baixo                                                                      | Baixo                                                                                                    | Alto                                                                                        | Baixo                                                                                      |
| <b>Complexidade do controlador</b>      | Média                                                                      | Baixa                                                                                                    | Média                                                                                       | Baixa                                                                                      |
| <b>Nível de maturidade da técnica</b>   | Mais comum no mercado                                                      | Protótipo                                                                                                | Protótipo                                                                                   | Comercial, porém menos comum.                                                              |
| <b>Resumo das vantagens</b>             | Controlar a potência ativa e reativa no rotor;                             | Com a redução do número de comutadores, o custo é reduzido e há uma redução das perdas de comutação;     | Redução de flutuações de energia devido às variações de velocidade do vento.                | Necessita de apenas 9 comutadores                                                          |
| <b>Resumo das desvantagens</b>          | Necessita de uma estratégia de controle mais complexa para cada conversor; | Necessita de uma comutação adequada para obter a regulação do link CC e o controle do fator de potência; | Devido à presença do banco de bateria, o custo é maior e necessita de manutenção constante. | As comutações não-ideais das chaves podem ocasionar picos de tensão ou surtos de corrente; |

Fonte: Própria

---

## 4. CONCLUSÕES GERAIS

---

O trabalho proposto apresentou um estudo comparativo sobre as topologias de conversores mais utilizadas para o gerador de indução duplamente alimentado aplicado à geração eólica a fim de apontar as vantagens e desvantagens de cada.

A partir da revisão de literatura de 6 artigos, foram analisadas 4 topologias utilizadas do gerador de indução duplamente alimentado aplicado à geração eólica. À princípio, foram analisados dois artigos que apresentavam a proposta de topologia mais usual, utilizando o conversor back-to-back, a seguir, foram estudados o conversor de 9 chaves, o conversor matricial e o conversor back-to-back com armazenamento de energia. Pôde-se concluir que mesmo o conversor back-to-back sendo o mais usual e que apresentou resultados favoráveis sob variações de velocidade do vento, o conversor de 9 chaves apresenta o mesmo desempenho mesmo com menor número de comutadores. O conversor direto em matriz consiste em 9 comutadores também e apresenta bom desempenho em relação à topologia usual, porém sua implementação é trabalhosa já que um problema na comutação das chaves pode causar surtos de corrente e picos de tensão. E a topologia utilizando o conversor back-to-back com o banco de bateria é vantajosa em relação ao nivelamento de potência, porém é mais complexa devido a utilização do banco de baterias.

Com a revisão de literatura de 6 artigos pode-se concluir que mesmo a topologia utilizando o conversor back-to-back ser a mais usual, há outros conversores mais simples e que podem obter o mesmo desempenho. A topologia utilizando o conversor de 9 chaves se mostrou bem vantajosa em relação às outras, pois apresenta 25% menos comutadores e obteve o mesmo desempenho em relação ao conversor back-to-back.

Como proposta da continuidade do trabalho, sugere-se a simulação no software Matlab/Simulink de estratégias de controle utilizando todas as principais topologias a fim de complementar os resultados comparativos.

---

## 5 . B I B L I O G R A F I A

---

Carlos Vilella do Carmo Dobbi, T. M., 2014. *Modelagem e controle de um aerogerador duplamente alimentado com turbina de velocidade variável para estudos de estabilidade eletromecânica*, Rio de Janeiro: s.n.

Crispim, K. S., 2018. *Estudo do Controle do Conversor Back-to-Back*, João Monlevade, MG: s.n.

Ganti, V. C. et al., 2012. DFIG-Based Wind Power Conversion With Grid Power Leveling for Reduced Gusts. *IEEE Transactions on sustainable energy*, Janeiro, 3(1).

Reis, P., 2019. Energia Eólica. *Portal Energia - Energias Renováveis*, 10 Fevereiro.

Roberto, C., 2019. Energia eólica chega a 14,71 GW de capacidade instalada. *Full Energy*, fevereiro.

Swami Naidu, N. K. & Singh, B., 2014. *Doubly fed induction generator based standalone wind energy conversion system with MPPT capability*. Delhi, India, IEEE.

Wenzel , G. M., 2007. *Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal*, Porto Alegre: s.n.

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2014. *Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil*. s.l.:s.n.

ABEEólica, 2018. *Energia Eólica*. [Online]  
Available at: <http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>  
[Acesso em 15 novembro 2018].

ABEEOLICA, 2018. Energia Eólica: Os bons ventos do Brasil. *Infovento nº7*, 01 agosto, p. 2.

ABEEOLICA, 2018. *Notícias Agência Abeolica*. [Online]  
Available at: <http://abeeolica.org.br/noticias/energia-eolica-ultrapassa-marca-de-14-gw-de-capacidade-instalada/>  
[Acesso em 15 novembro 2018].

Anon., 2013. *Fontes difusas de energia*. [Online]  
Available at: <http://introducaoengenharia.wixsite.com/projeto/tecnologia-sobre-a-energia-elica>  
[Acesso em 07 novembro 2018].

Aouzellag, D., Berkouk, E. & Ghedamsi, K., 2006. *Application of Matrix Converter for Variable Speed Wind Turbine Driving an Doubly Fed Induction Generator*. Taormina, Italia, s.n.

Barifouse , R. & Schreiber, M., 2015. *BBC Brasil*. [Online]  
[Acesso em 2018].

Brasil, 2015. *LEI 13.097/2015*. [Online]  
Available at: <http://www.energia.sp.gov.br/energias-renovaveis/eolica/incentivo-ao-setor/>

Carvalho, A. J. d. S., 2010. *Antonio José Santos Carvalho*. [Online]  
Available at: <https://sites.google.com/site/antoniojosesantoscavvalho/home>  
[Acesso em 2018].

CEPEL/CRESESB, 2008. Energia Eólica: Princípios e tecnologias. maio.

Chabani, M. S., Benchouia, M. T., Golea, A. & Boumaaraf , R., 2017. *Implementation of Direct Stator Voltage Control of Stand-Alone DFIG-Based Wind Energy Conversion System*. Boumerdes, Argélia, s.n.

da Silva, K. F., 2006. Controle e integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados.. pp. 41-43.

Energia, M. d. M. e., 2017. *Bolentins de Energia*. Ano de referencia 2016 ed. s.l.:s.n.

Franco, F. A. L. et al., 2017. Estudo das proteções de geradores eólicos duplamente alimentados em ambiente de co-simulação embarcada. *THE 12TH LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2017*.

Gannoum, E., 2018. *Conteudo*, *Exame*. [Online] Available at: <https://exame.abril.com.br/economia/eolicas-serao-2a-fonte-de-energia-do-pais-em-2019/>

[Acesso em 2018 novembro 05].

Ghedamsi, K., Aouzellag, D. & Berkouk, E. M., 2008. *Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system*. s.l., Elsevier.

Kandasamy, K. V., Sahoo, S. K. & Karthikeyan, S. P., 2015. A Technology Review on Matrix Converter. *Power Sector*, Abril.

Kharchouf, I., Essadki, A., Arbaoui, M. & Nasser, T., 2017. Modeling and PI Control Strategy of DFIG based Wind Energy Conversion Systems. *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Dezembro.

Marques, J., 2004. *Turbinas Eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação*, Santa Maria, RS: s.n.

Mosqueira Rodrigues Lopes, M. T., 2016. *Concepção, Modelagem e Simulação de uma Turbina Eólica em Escala*, Rio de Janeiro: s.n.

Nise, N. S., 2013. *Engenharia de sistemas de controle*. Rio de Janeiro: LTC.

Nunes, W., 2019. Investimento em eficiência energética será maior em 2019, aponta pesquisa. *Eficiência energética*, 11 Janeiro.

---

Power, S. V., 2018. *Green Power*. [Online] Available at: <https://br.pinterest.com/pin/449656344016934193/> [Acesso em 2018].

Rocha, M. A., 2018. *Modelagem e Controle de Gerador de Indução Duplamente Alimentado para Estudo de Sistema de Geração Eólica*, Bauru, SP: s.n.

Silva, R. F., 2012. *Emulação de uma turbina eólica e controle vetorial do gerador de indução rotor gaiola de esquilo para um sistema eólico*, Rio de Janeiro: s.n.

Simas, M. S., 2012. *Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada*, São Paulo: s.n.

Soe, N. P., Vilathgamuwa, M. & Low, K.-S., 2011. *Doubly Fed Induction Generator for wind energy generation using nine-switch power converter*. Melbourne, Austrália, s.n.

---